

PROBLEMAS Y CUESTIONES

1. Dado un convertor *buck* o *step-down*

a) Dibuje un diagrama en el tiempo con las formas de onda en estado estacionario de las siguientes señales: señal de control del interruptor, diferencia de potencial en los extremos de la inductancia, corrientes en el diodo, el transistor que funciona como interruptor, la inductancia y el condensador. Suponga que el condensador es suficientemente grande como para poder considerar que su tensión es constante. Haga el diagrama suponiendo funcionamiento en modo continuo y en modo discontinuo.

b) Demuestre que en modo continuo la relación entre la salida y la entrada es: $V_o = DV_i$.

c) Explique qué condición debe verificarse para que el convertor se mantenga en modo continuo.

d) Encuentre una expresión para calcular el rizado en el condensador.

e) Justifique que, si el convertor funciona con una carga resistiva R_L , la corriente media en la inductancia es V_o / R_L .

f) Demuestre que en modo discontinuo la relación entre la salida y la entrada es: $V_o = DV_i / (D + \Delta_I)$, siendo Δ_I la fracción del periodo durante la cual la corriente de la inductancia disminuye.

g) Demuestre que $\Delta_I = 2LI_o / (T_S DV_{in})$.

2. Para un convertor *buck* o *step-down*, evalúe para que valor del ciclo de trabajo de la señal de control del interruptor se dan las condiciones más desfavorables desde el punto de vista del paso a modo discontinuo si opera:

a) Con tensión de entrada constante.

b) Con tensión de salida constante.

3. Dado un convertor *buck* o *step-down* con los siguientes parámetros:

$L = 25 \mu\text{H}$; $V_{in} = 42 \text{ V}$; $D = 0,3$; $P_{out} = 24 \text{ W}$; $f_s = 400 \text{ kHz}$.

a) Calcule la tensión de salida.

b) Suponiendo que opera con una carga resistiva, calcule el valor de la resistencia de carga y la corriente de salida.

c) Verifique que opera en modo continuo.

d) Para la inductancia, calcule su corriente máxima, mínima, promedio y la variación de su corriente.

e) Determine el valor del condensador para obtener un rizado máximo del 1%.

4. Dado un convertor *buck* o *step-down* con los siguientes parámetros:

$V_{in} = 25 \text{ V}$; $f_s = 50 \text{ kHz}$; resistencia de carga $R_L \leq 5 \Omega$.

a) Se desea obtener una tensión de salida de 5 V. Determine el valor mínimo de L para garantizar que operará en modo continuo.

b) Se construye el circuito con una inductancia especificada para una corriente máxima de 3,5 A. ¿Cuál es el mínimo valor de R_L que se puede utilizar?

c) Repita el apartado **a)** suponiendo ahora que la tensión de entrada puede variar entre 10 V y 40 V. En este caso se ajustará el valor de D para conseguir $V_o = 5 \text{ V}$. El valor de L calculado debe garantizar el funcionamiento en modo continuo para cualquier valor de V_{in} en el rango especificado.

d) Si el convertor va a operar entregando a su salida una potencia máxima de 25 W, determine la corriente máxima que circulará por la inductancia.

e) En las condiciones de los apartados **c)** y **d)** (V_{in} entre 10 V y 40 V y P_{MAX} de salida 25 W y el valor de L calculado en **c)**), calcule el valor del condensador para que el rizado de salida no supere el 0,1%.

f) Calcule el valor mínimo del condensador para que la frecuencia de corte del filtro LC de salida sea 10 veces menor que la frecuencia de conmutación. (Tome el valor de L calculado en **c)**).

5. Dado un convertor *buck* o *step-down* con los siguientes parámetros:

$L = 50 \mu\text{H}$; $V_{in} = 25 \text{ V}$; $f_s = 50 \text{ kHz}$.

Se desea que el conversor genere una tensión de salida $V_o = 10 \text{ V}$ sobre una carga resistiva R_L .

- a) Determine los rangos de valores de R_L para los que el conversor operará en modo continuo y en modo discontinuo.
- b) Encuentre el valor o la expresión del ciclo de trabajo D que deberá tener la señal de control del interruptor para todo el rango de valores de R_L .

6. Dado un conversor *boost* o *step-up*

- a) Dibuje un diagrama en el tiempo con las formas de onda en estado estacionario de las siguientes señales: señal de control del interruptor, diferencia de potencial en los extremos de la inductancia, corrientes en el diodo, el transistor que funciona como interruptor, la inductancia y el condensador. Suponga que el condensador es suficientemente grande como para poder considerar que su tensión es constante. Haga el diagrama suponiendo funcionamiento en modo continuo y en modo discontinuo.
- b) Demuestre que en modo continuo la relación entre la salida y la entrada es: $V_{out} = V_{in} / (1-D)$.
- c) Encuentre expresiones para calcular las corrientes máxima y mínima de la inductancia, así como la variación de esta corriente. (Considere en este apartado que el conversor opera en modo continuo).

7. Dado un conversor *boost* o *step-up* con los siguientes parámetros:

$V_{in} = 12 \text{ V}$; $L = 25 \text{ } \mu\text{H}$; $f_s = 400 \text{ kHz}$; $D = 0,4$; potencia de salida $P_{out} = 25 \text{ W}$.

- a) Calcule la tensión de salida.
- b) Suponiendo que la carga es una resistencia, determine su valor y el de la corriente de salida.
- c) Calcule las corrientes máxima y mínima de la inductancia, así como la variación de corriente en ella.
- d) Calcule las corrientes máximas y las diferencias de potencial máximas en el transistor y el diodo.
- e) Calcule el valor del condensador para que el rizado de la salida no supere el 0.1%.

8. Para el mismo conversor del problema 7, encuentre el límite que garantiza el modo continuo de:

- a) La resistencia de carga.
- b) La potencia de salida.
- c) La frecuencia de conmutación.
- d) El valor de la inductancia.

9. El mismo conversor del problema 7 opera ahora con una entrada que varía entre 9 V y 15 V. Se ajusta el valor del ciclo de trabajo D de la señal de control para mantener una salida $V_o = 20 \text{ V}$.

- a) Determine el valor crítico de la inductancia que garantiza el funcionamiento en modo continuo si la potencia de salida cumple $P_o \geq 5 \text{ W}$.

10 Dado un conversor *boost* o *step-up* con los siguientes parámetros:

$V_{in} = 5 \text{ V}$; $L = 50 \text{ } \mu\text{H}$; $f_s = 25 \text{ kHz}$; $V_{out} = 20 \text{ V}$.

- a) Calcule el valor requerido de D si la resistencia de carga puede variar entre $10 \text{ } \Omega$ y $100 \text{ } \Omega$.

11. Dado un conversor *buck-boost* o *down-up*:

- a) Dibuje un diagrama en el tiempo con las formas de onda en estado estacionario de las siguientes señales: señal de control del interruptor, diferencia de potencial en los extremos de la inductancia, corrientes en el diodo, el transistor que funciona como interruptor, la inductancia y el condensador. Suponga que el condensador es suficientemente grande como para poder considerar que su tensión es constante. Haga el diagrama suponiendo funcionamiento en modo continuo y en modo discontinuo.
- b) Demuestre que en modo continuo la relación entre la salida y la entrada es: $V_{out} = DV_{in} / (1-D)$.
- c) Encuentre expresiones para calcular las corrientes máxima y mínima de la inductancia, así como la variación de esta corriente. (Considere en este apartado que el conversor opera en modo continuo).

12. Considere un convertor *buck-boost* o *down-up* que opera con una frecuencia de conmutación $f_s = 400$ kHz. La tensión de entrada varía entre 9 V y 15 V y se ajusta D para obtener una tensión de salida $V_{out} = 18$ V.

- Si la potencia de salida mínima es de 5 W, determine el valor mínimo de L que garantiza el funcionamiento en modo continuo.
- Determine el valor del condensador para que el rizado no supere el 0,1%. Considere aquí que la potencia de salida no superará los 50 W.

13. Considere un convertor *buck-boost* o *down-up* con los siguientes parámetros:

$L = 100$ μ H; $f_s = 25$ kHz; $V_{in} = 10$ V; $R_L = 100$ Ω .

- Calcule el ciclo de trabajo D de la señal de control para obtener una tensión de salida $V_o = 20$ V, suponiendo funcionamiento en modo continuo.
- Para el valor de D calculado, determine el rango de valores de R_L para que el convertor funcione efectivamente en modo continuo.
- Determine el valor real de la tensión de salida fijando el valor de D calculado en el apartado a).

14. Considere un convertor Cúk. Suponiendo que opera en modo continuo, y que los condensadores mantienen una tensión constante:

- Represente las formas de onda en estado estacionario de las diferencias de potencial en las inductancias y las corrientes en las inductancias.
- Represente las formas de onda de las corrientes en el transistor y en el diodo.
- Encuentre la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada en función de D .
- Determine cuál será la diferencia de potencial en los extremos del condensador C_1 .

15. Repita el problema 14, pero considerando un convertor SEPIC.

16. Se desea realizar un circuito para controlar la velocidad de giro de un motor, partiendo de una batería de 12 V. El motor puede modelarse como una fuente de tensión de 6 V con una resistencia en serie de 0,1 Ω . Además, se desea que al frenar el motor recargue la batería. (Figura 6).

- Dibuje el esquema de un convertor bidireccional que permita realizar las funciones especificadas.
- Calcule la potencia transferida al motor si la señal de control tiene un ciclo de trabajo $D = 0,55$. (Esta es la señal de control aplicada al interruptor del lado alto del convertor).
- Calcule la potencia entregada por el motor a la batería cuando la señal de control del interruptor del lado alto tiene un ciclo de trabajo $D = 0,4$. Calcule el rendimiento de este proceso (potencia entregada a la batería con respecto a la potencia perdida por el motor). Calcule también la corriente media inyectada a la batería.
- ¿En qué rangos de valores del ciclo de trabajo D de la señal de control del interruptor del lado alto el motor se acelera o se frena?

17. Se utiliza un convertor bidireccional como interfaz entre 2 baterías de fuerzas electromotrices $E_1 = 40$ V y $E_2 = 13$ V. Ambas tienen resistencias internas de 0,1 Ω . Determine el ciclo de trabajo D (lado alto) del convertor si:

- La batería pequeña recibe una potencia de 140 W.
- La batería pequeña entrega una potencia de 140 W.

18. Considere un convertor de puente completo. La señal de control de los interruptores se genera comparando una señal de referencia con una señal triangular. Considere que la señal de referencia es igual a la mitad de la amplitud de la señal triangular.

- Represente las formas de onda de las señales V_A , V_B y V_{AB} en modo de conmutación de tensión bipolar.
- Represente la forma de onda de las señales V_A , V_B y V_{AB} en modo de conmutación de tensión unipolar.

c) En los dos casos anteriores, encuentre la relación entre el nivel de continua la tensión de salida y la tensión de entrada.

19. Se desea construir una fuente de alimentación que proporcione hasta 400 W con una tensión de salida de 5 V.

La fuente se alimentará de la red y tendrá etapa de rectificación y filtrado que generará una señal no regulada que variará entre 240 V y 300 V.

La fuente incluirá un circuito de control que ajustará el ciclo de trabajo de la señal de conmutación para mantener la tensión de salida fija en 5 V.

Realice un diseño de esa fuente utilizando un convertor *buck* con las siguientes condiciones: se utilizarán dispositivos capaces de conmutar a frecuencias de 1 MHz, se debe garantizar que la fuente opera en modo continuo cuando proporciona potencias de 100 W o más y el rizado de salida no debe superar el 0,1%.

En concreto, calcule:

- El valor mínimo de la inductancia.
- La corriente máxima de pico que deberá soportar la inductancia.
- El valor mínimo del condensador.

20. Se desea realizar un inversor a partir de un convertor de medio puente (figura 20).

a) Explique cómo se debe generar la señal de control de los interruptores y dibuje la forma de onda de esta señal. ¿Qué es el índice o coeficiente de modulación de frecuencia? ¿Qué es el índice o coeficiente de modulación de amplitud?

b) Represente las formas de onda de V_{AN} y V_{AO} .

c) A grandes rasgos, ¿qué componentes de frecuencia tiene la salida?

d) ¿Qué elemento debe añadirse a la salida del convertor para obtener la función sinusoidal deseada?

21. ¿Qué se entiende por sobremodulación, en el contexto de la generación de la señal PWM aplicada a los interruptores en un inversor? ¿Qué componentes de frecuencia adicionales aparecen en esta situación? ¿Qué se entiende por operación en modo de onda cuadrada?

22. Explique en qué consiste el control en modo bipolar y en modo unipolar para un inversor de puente completo (figura 22). ¿Qué ventaja ofrece el control en modo unipolar?

FIGURAS

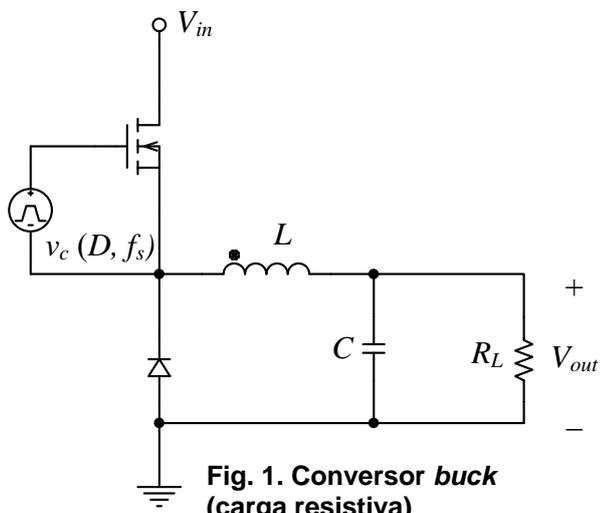


Fig. 1. Conversor *buck* (carga resistiva)

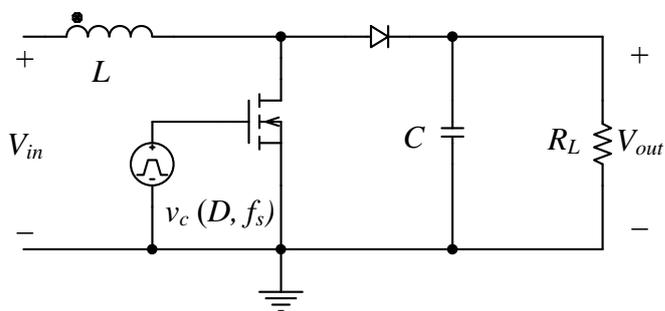


Fig. 2. Conversor *boost* (carga resistiva)

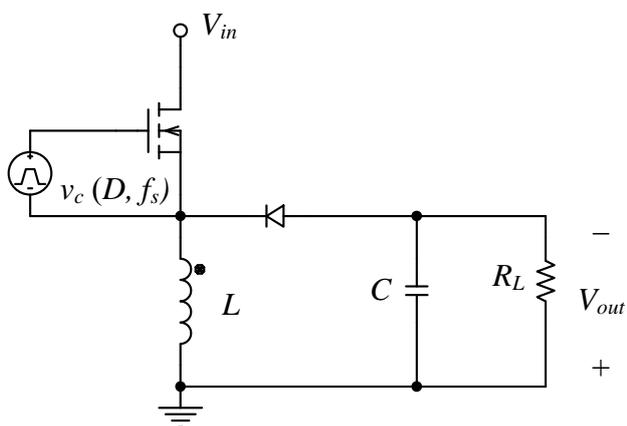


Fig. 3. Conversor *buck-boost* (carga resistiva)

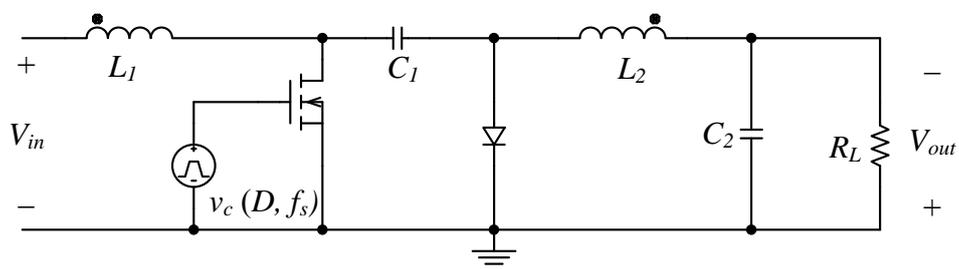


Fig. 4. Conversor *Cúk* (carga resistiva)

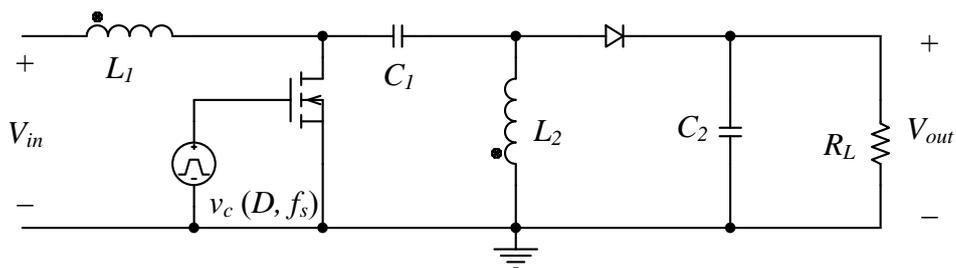


Fig. 5. Conversor SEPIC (carga resistiva)

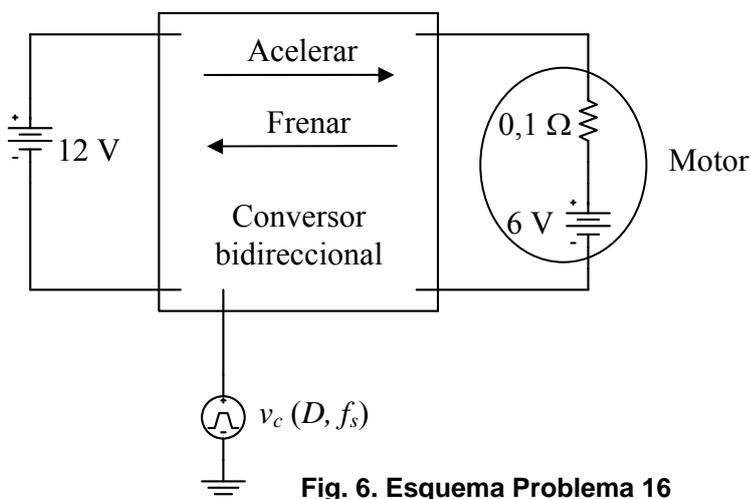


Fig. 6. Esquema Problema 16

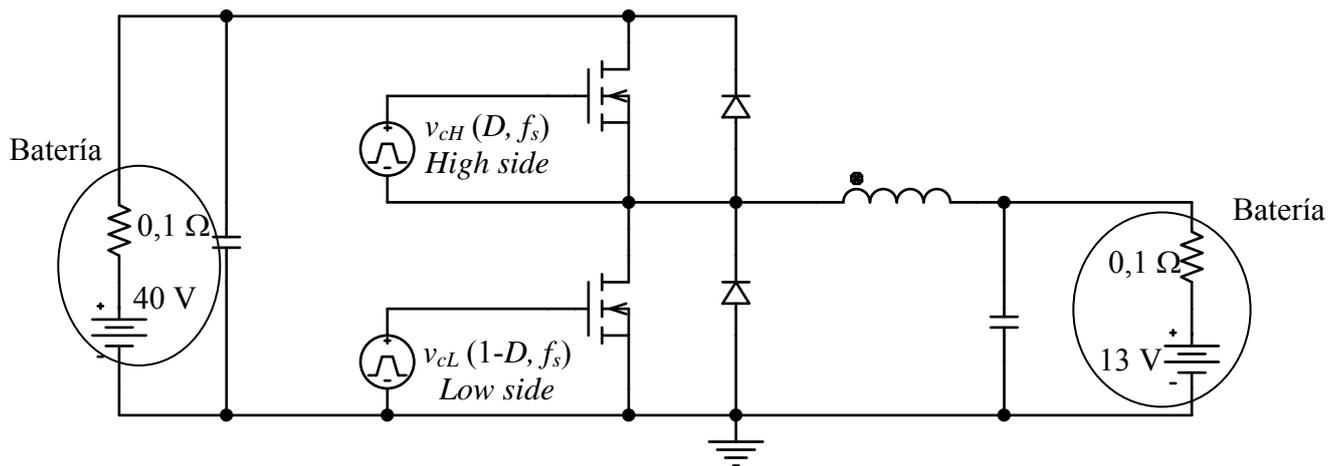


Fig. 7. Conversor bidireccional como interfaz entre dos baterías. Problema 17

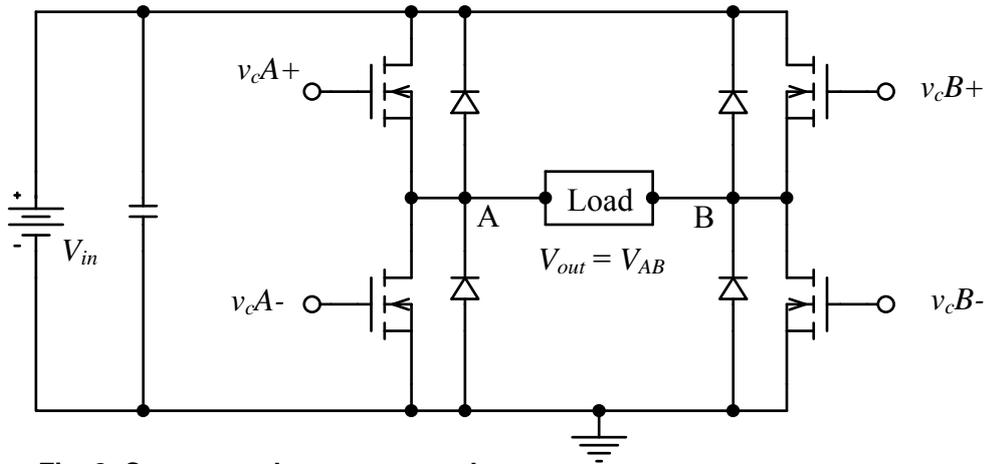


Fig. 8. Conversor de puente completo.

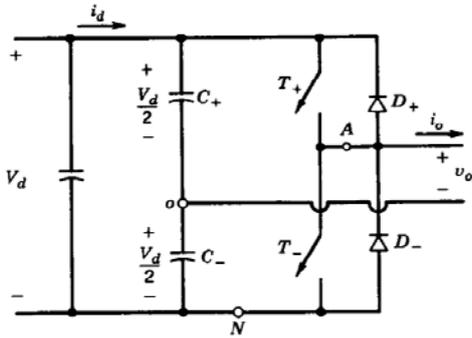


Fig. 20. Inversor de medio puente

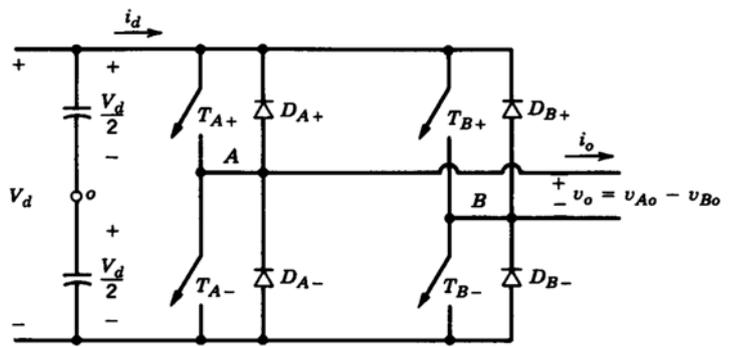


Fig. 22. Inversor de puente completo

SOLUCIONES

1. Visto en clase.

2. Visto en clase.

3. a) $V_{out} = 12,6 \text{ V}$.

b) $R_L = 6,615 \Omega$; $I_o = 1,905 \text{ A}$.

c) $I_{OB} = 0,441 \text{ A}$. La corriente de salida es mayor.

d) $i_{LMAX} = 2,346 \text{ A}$; $i_{LMIN} = 1,464 \text{ A}$; $i_{LPROM} = I_o = 1,905 \text{ A}$; $\Delta i_L = i_{LMAX} - i_{LMIN} = 0,882 \text{ A}$.

e) $C \geq 2,1875 \mu\text{F}$.

4. a) $L \geq 40 \mu\text{H}$.

b) $R \geq 2 \Omega$.

c) $L \geq 43.75 \mu\text{H}$.

d) $i_{LMAX} = 6 \text{ A}$.

e) $C \geq 1 \text{ mF}$.

f) $C \geq 23,16 \mu\text{F}$.

- 5. a)** Modo continuo: $R \leq 8,33 \Omega$; Modo discontinuo $R > 8,33 \Omega$.
b) En modo continuo $D = 0,4$. En modo discontinuo $D = \sqrt{4/3R}$.
- 6.** Visto en clase.
- 7. a)** $V_{out} = 20 \text{ V}$.
b) $R_L = 16 \Omega$; $I_{out} = 1,25 \text{ A}$.
c) $i_{LMAX} = 2,323 \text{ A}$; $i_{LMIN} = 1,843 \text{ A}$; $\Delta i_L = i_{LMAX} - i_{LMIN} = 0,48 \text{ A}$.
d) Las Corrientes máximas en el transistor y en el diodo coinciden con i_{LMAX} . La diferencia de potencial máxima es $V_{out} = 20 \text{ V}$.
e) $C \geq 62,5 \mu\text{F}$.
- 8. a)** $R_L \leq 138,89 \Omega$.
b) $P_{out} \geq 2,88 \text{ W}$.
c) $f_s \geq 46,08 \text{ kHz}$.
d) $L \geq 2,88 \mu\text{H}$.
- 9.** $L \geq 14,81 \mu\text{H}$.
- 10.** En modo continuo, $D = 0,75$. Sin embargo, si $R_L > 53,3 \Omega$ operará en modo discontinuo. En modo discontinuo $D = \sqrt{30/R_L}$.
- 11.** Visto en clase.
- 12. a)** $L \geq 16,7 \mu\text{H}$.
b) $C \geq 257,2 \mu\text{F}$.
- 13. a)** $D = 2/3$.
b) $R \leq 45 \Omega$ para funcionamiento en modo continuo.
c) Está en modo discontinuo. $V_{out} = 28,81 \text{ V}$.
- 14 y 15.** Vistos en clase.
- 16. a)** Se puede utilizar un convertor bidireccional como el de la figura 7. La señal de control del lado bajo sería la complementada de la señal de control del lado alto.
b) $P = 39,6 \text{ W}$ (transferida al motor).
c) $P = 57,6 \text{ W}$. La corriente que entrega el motor es de 12 A . Se disipa una potencia de $14,4 \text{ W}$ en la resistencia interna del motor. El motor realmente pierde 72 W . El rendimiento es del 80% . La corriente media de entrada a la batería es de $4,8 \text{ A}$.
d) Para $D > 0,5$ se entrega potencia al motor (la tensión a la entrada del motor sería mayor que 6 V . Para $D < 0,5$ el motor devuelve potencia.
- 17. a)** $D = 0,353$
b) $D = 0,293$
- 18.** Visto en clase.

19. a) Para mantener la salida, el ciclo de trabajo debería mantenerse entre $5/300$ y $5/240$. Son valores muy bajos, tal vez poco realistas. Supongamos que el sistema de control es capaz de hacer conmutar los dispositivos con esos ciclos de trabajo y que los retardos son despreciables.

Para garantizar el funcionamiento en modo continuo debe cumplirse $I_O \geq I_{OB}$. El caso peor corresponde a la I_{OB} máxima (D mínimo) y la situación en que I_O es mínima (100 W). Con esto: $L \geq 122,9$ nH.

b) $I_{MAX} = 100$ A.

c) $C \geq 1$ mF.

20.

a) La señal de control de los interruptores V_{PWM} se genera comparando una señal triangular (V_{tri}) con una señal de control ($V_{control}$) de la misma frecuencia que la señal AC que se desea generar. En la diapositiva 8 del tema 6 se muestran estas señales.

El coeficiente de modulación de amplitud es el cociente de la amplitud de la señal de control entre la amplitud de la señal triangular. El coeficiente de modulación de frecuencia es el cociente de la frecuencia de la señal triangular entre la frecuencia de la señal de control.

b) La señal V_{AN} tiene la misma forma que la señal V_{PWM} de control de los interruptores, pero su máximo es la entrada V_d . La señal V_{Ao} es igual que V_{AN} , pero desplazada $V_d/2$, con lo cual su componente DC es nula.

c) Tiene una componente de la frecuencia de la señal de control, y aparecen componentes de frecuencia en torno a la frecuencia de la señal triangular y sus múltiplos.

d) Un filtro pasa-baja que permita el paso de la frecuencia fundamental y elimine las frecuencias elevadas.

21. Se produce sobremodulación cuando la amplitud de la señal de control es mayor que la de la señal triangular. En este caso aparecen armónicos de la frecuencia fundamental. La operación en modo de onda cuadrada es un caso extremo de sobremodulación, en que la amplitud de la señal de control es mucho mayor que la de la señal triangular. En este caso, prácticamente para todo el ciclo positivo de la señal de control, la señal V_{PWM} toma el valor alto (ya que $V_{control} > V_{tri}$) y para el ciclo negativo toma el valor bajo (ya que $V_{control} < V_{tri}$). La forma de onda es la de una señal cuadrada, cuya frecuencia fundamental es la de $V_{control}$ y con componentes de frecuencia correspondientes a armónicos de esta frecuencia.

22. En el modo de control bipolar se genera una única señal V_{PWM} que se aplica a los transistores TA+ y TB- (activándose TA- y TB+ de forma complementaria). En el modo de control unipolar, TA+ y TA- se controlan con una señal V_{PWM1} (siempre activándose de forma complementaria) y los interruptores TB+ y TB- se controlan con otra señal V_{PWM2} . V_{PWM1} se genera comparando $V_{control}$ con una señal triangular. V_{PWM2} se genera comparando $-V_{control}$ con la misma señal triangular. La ventaja del modo unipolar es que no aparecen componentes de frecuencia a la frecuencia f_s de la señal triangular, sino que empiezan a aparecer para $2f_s$, por lo que el filtrado para eliminar esas altas frecuencias es más fácil.