

Conversión CC/CC

Electrónica de Potencia

Autores (orden alfabético): A. Barrado, C. Fernández, A. Lázaro,
E. Olías, M. Sanz, P. Zumel

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid



Índice tema

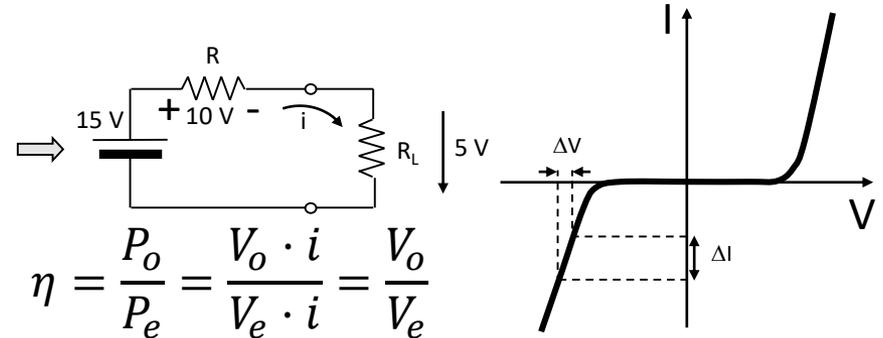
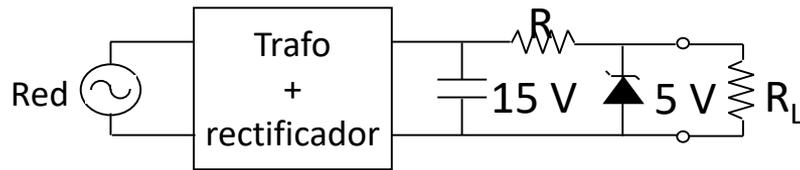
- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Índice tema

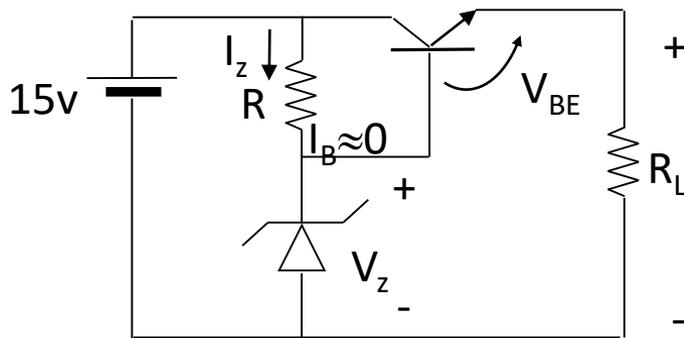
- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Fuente de alimentación lineal: ejemplos (I)

1. Diseños simples e iniciales empleando Zener



2. Mejoras sobre el circuito

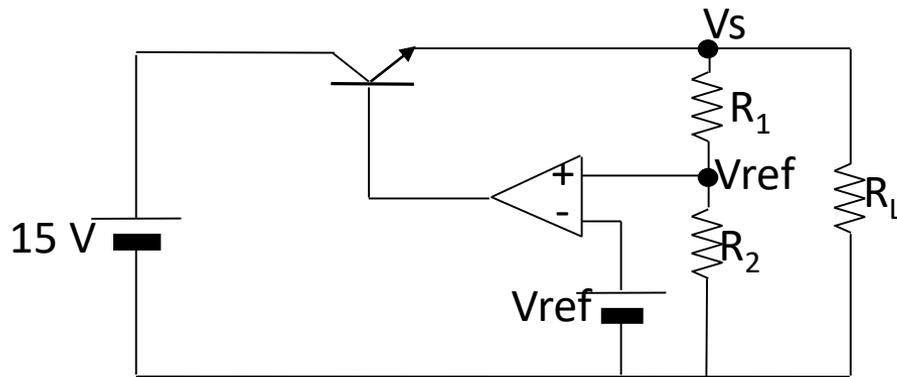


Inconvenientes:

- ❌ V_Z afectada por la entrada, no por la salida
- ❌ Si se varía la entrada, varía la polarización del Zener y por lo tanto la tensión de salida

Fuente de alimentación lineal: ejemplos (II)

3. Aproximación al regulador lineal



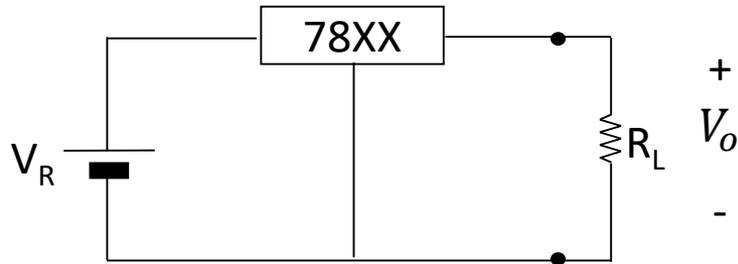
$$V_{ref} = V_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \longrightarrow V_o = V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

Ventajas:

- ✓ Se consigue más grados de libertad, ya que con cualquier V_{ref} se puede conseguir una determinada tensión de salida V_o , puesto que depende de otros parámetros (R_1 y R_2)
- ✓ La mayor parte de la corriente de entrada circula por el transistor de potencia
- ✓ Por el amplificador operacional circula la corriente de base del transistor

Fuente de alimentación lineal: ejemplos (III)

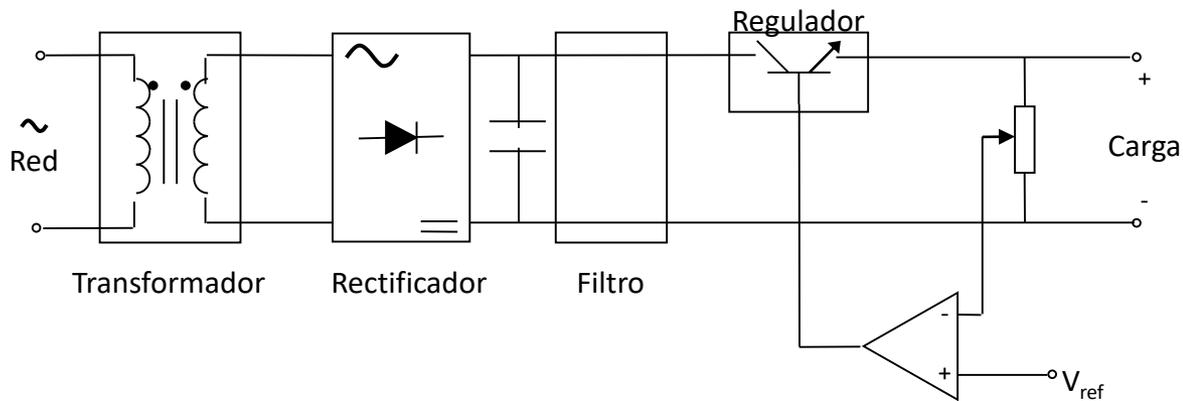
4. Regulador lineal comercial de la familia 78XX



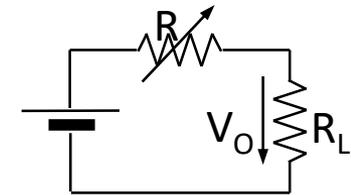
Características:

- V_o es fija en función del componente que se utiliza
- Si se utiliza un integrado de una familia distinta a la 78XX, en general hay que emplear resistencias externas para fijar la tensión de salida V_o

Fuente de alimentación lineal



Circuito equivalente

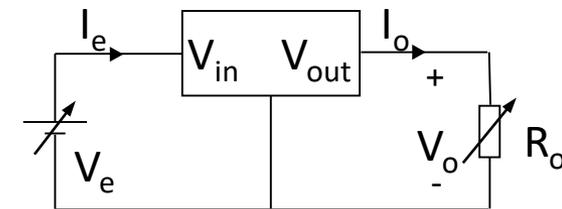


Ventajas:

- ✓ Robustas
- ✓ Diseño Simple
- ✓ Pocos componentes
- ✓ Mejor Fiabilidad
- ✓ Carga Mínima=0

Inconvenientes:

- ✗ Pesadas
- ✗ Voluminosas
- ✗ Rendimiento dependiente de la relación entre tensiones
- ✗ Evacuación de calor



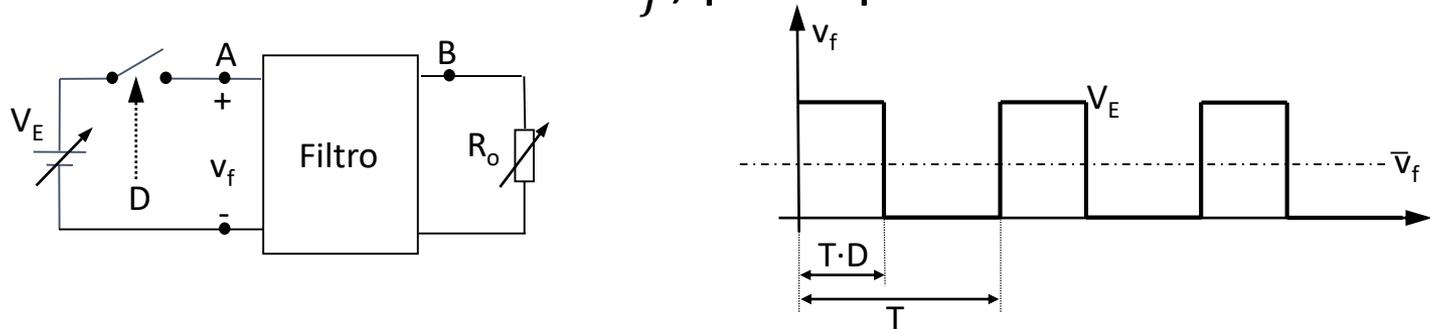
$$\eta = \frac{P_o}{P_e} = \frac{V_o}{V_e}$$

Ámbito de Utilización: Potencias pequeñas y tensiones de entrada y salida muy próximas

Necesario regulador de rendimiento más elevado y que pueda aplicarse a un rango de potencia mayor

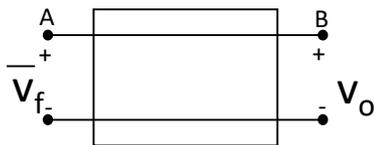
Fuente de alimentación conmutada (I)

- Se pretende diseñar un circuito electrónico que deje pasar íntegro el valor medio de la tensión v_f , pero que elimine sus armónicos



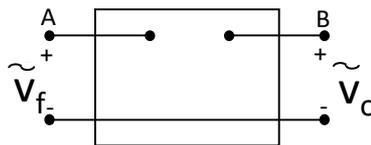
- Se requiere un filtro. Características del filtro ideal:

1. Componente continua



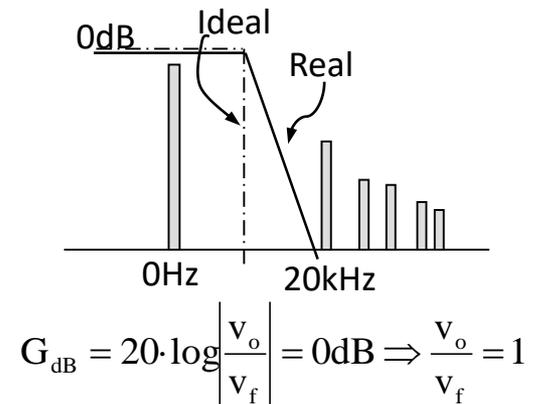
Debe pasar íntegra a la salida el valor medio de la señal de entrada. $\overline{V_f} = V_o$

2. Resto de los armónicos



Los armónicos no deben pasar a la carga, o pasar lo suficientemente atenuados. $\frac{\tilde{V}_o}{\tilde{V}_f}$

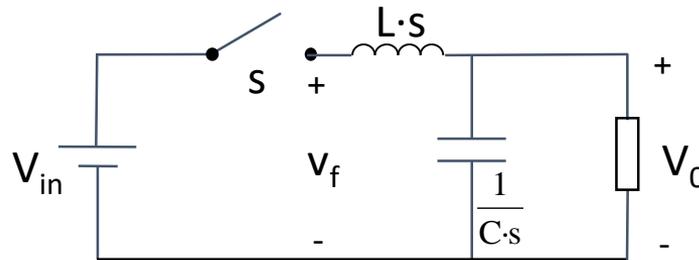
3. Representación frecuencial



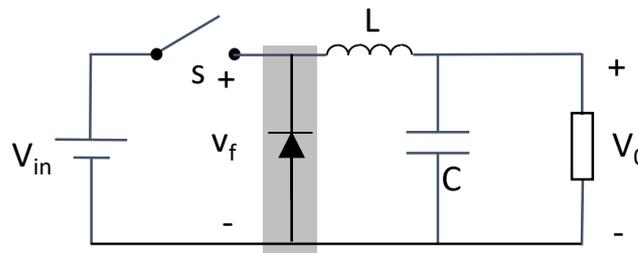
Fuente de alimentación conmutada (II)

- Utilización de un filtro LC:

- No disipa potencia porque se trata de elementos reactivos, que idealmente almacenan energía pero no la consumen

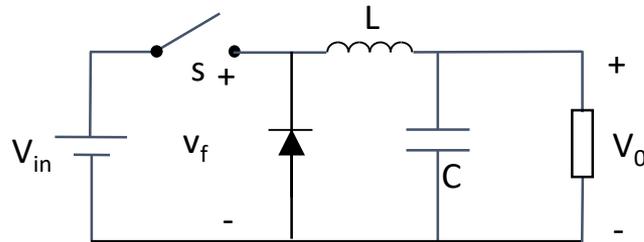


- Es necesario un diodo de libre circulación para no interrumpir bruscamente la corriente por la bobina



Fuente de alimentación conmutada (III)

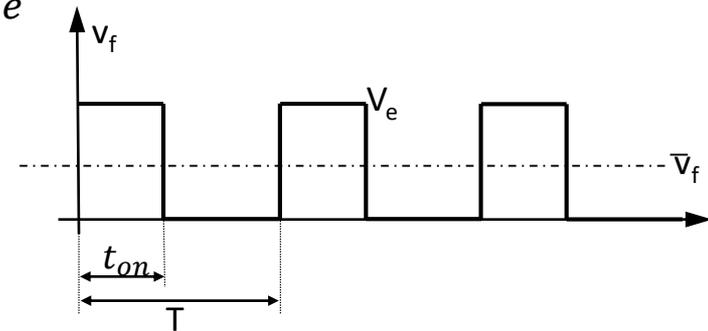
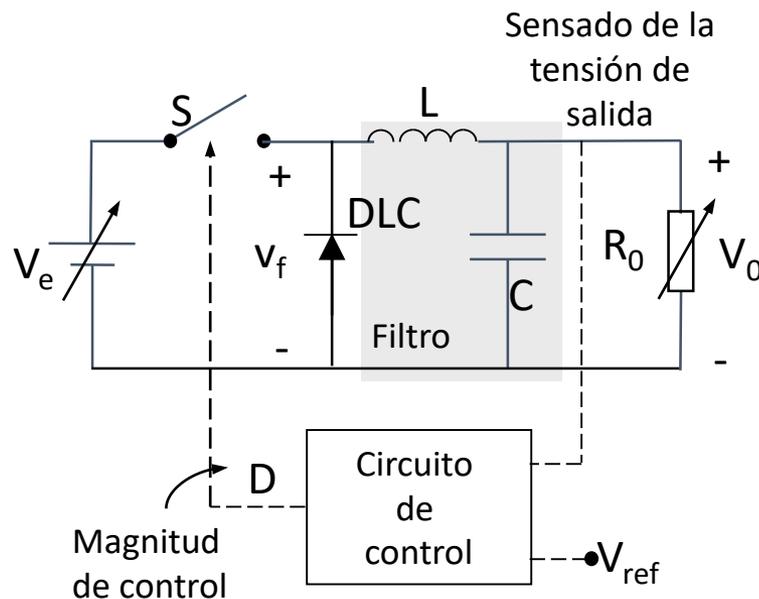
- Estructura básica de un convertidor CC/CC conmutado (reductor):



- Características:
 - Idealmente la tensión y la corriente no conviven en los elementos en conmutación (interruptor y diodo)
 - Idealmente los elementos reactivos no consumen potencia
 - Puesto que los elementos constructivos de la fuente de alimentación conmutada no consumen potencia, el rendimiento ideal es 1
- Fuente de alimentación real:
 - En la realidad todos los elementos presentan pérdidas:
 - Semiconductores: pérdidas en conducción y en conmutación
 - Elementos reactivos: pérdidas por efecto Joule debidas a las resistencias parásitas
 - Aun así el rendimiento de las fuentes de alimentación conmutadas es muy alto

Fuente de alimentación conmutada (IV)

- Se dispone de una variable que permite controlar algunas de las señales en el circuito (como la tensión de salida) ante las perturbaciones externas:
 - Variaciones de la tensión de entrada V_e
 - Variaciones de la carga R_o



$$V_o = \overline{v_f} = \frac{1}{T} \cdot t_{on} \cdot V_e = d \cdot V_e$$

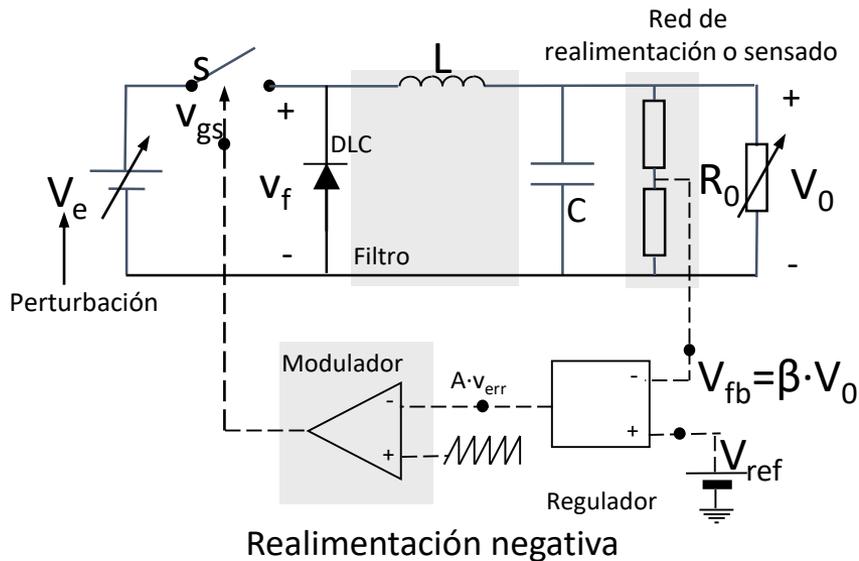
$$d = \frac{t_{on}}{T}$$

Variable de control: ciclo de trabajo d
 Tiempo que permanece encendido el interruptor principal t_{on} frente al período de conmutación T

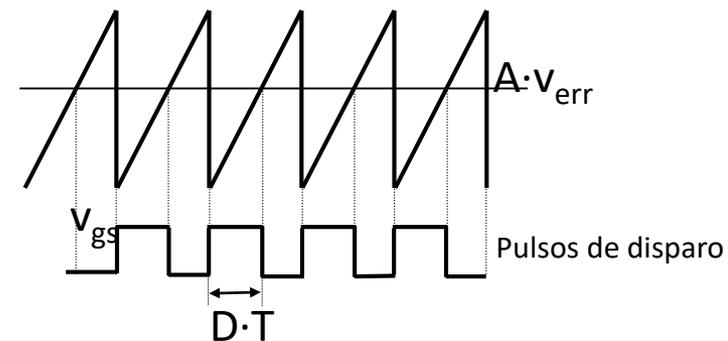
Fuente de alimentación conmutada (V)

- Control por ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation): se mantiene constante la frecuencia de conmutación y se cambia el tiempo que permanece encendido el interruptor principal

Ejemplo esquema de control de la tensión de salida



Ejemplo modulador para la generación de los pulsos de disparo del MOSFET principal (PWM)



Índice tema

- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Clasificación convertidores CC/CC (I)

- En función del número de transistores
- En función de la presencia o no de transformador
 - Con o sin aislamiento galvánico
- En función de la forma de gobierno del interruptor:
 - Con frecuencia de conmutación constante y variación del ancho de pulso
 - Con frecuencia de conmutación variable y tiempo de encendido fijo o tiempo de apagado fijo
- En función de la forma de onda:
 - Onda cuadrada
 - Quasiresonantes
 - Multiresonantes
 - Resonantes

Clasificación convertidores CC/CC (II)

- Topología más comunes:
 - Sin transformador:
 - Reductor
 - Elevador
 - Reductor-elevador
 - Cuk
 - SEPIC
 - Con transformador:
 - Forward
 - Flyback
 - Push-pull
 - Medio puente
 - Puente completo

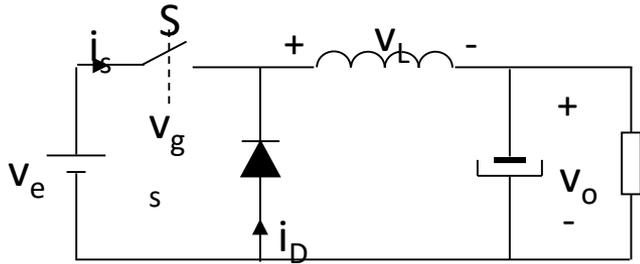
Índice tema

- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

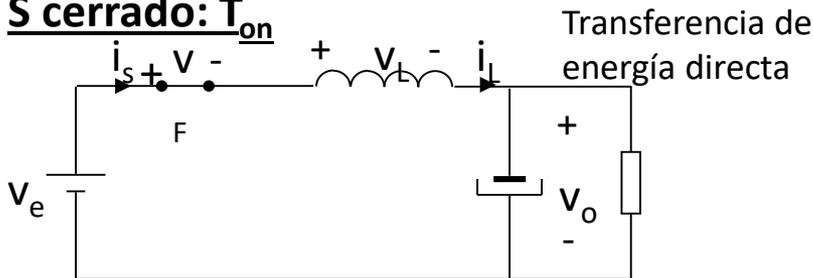
Convertidor reductor: formas de onda MCC

MCC: modo de conducción continuo

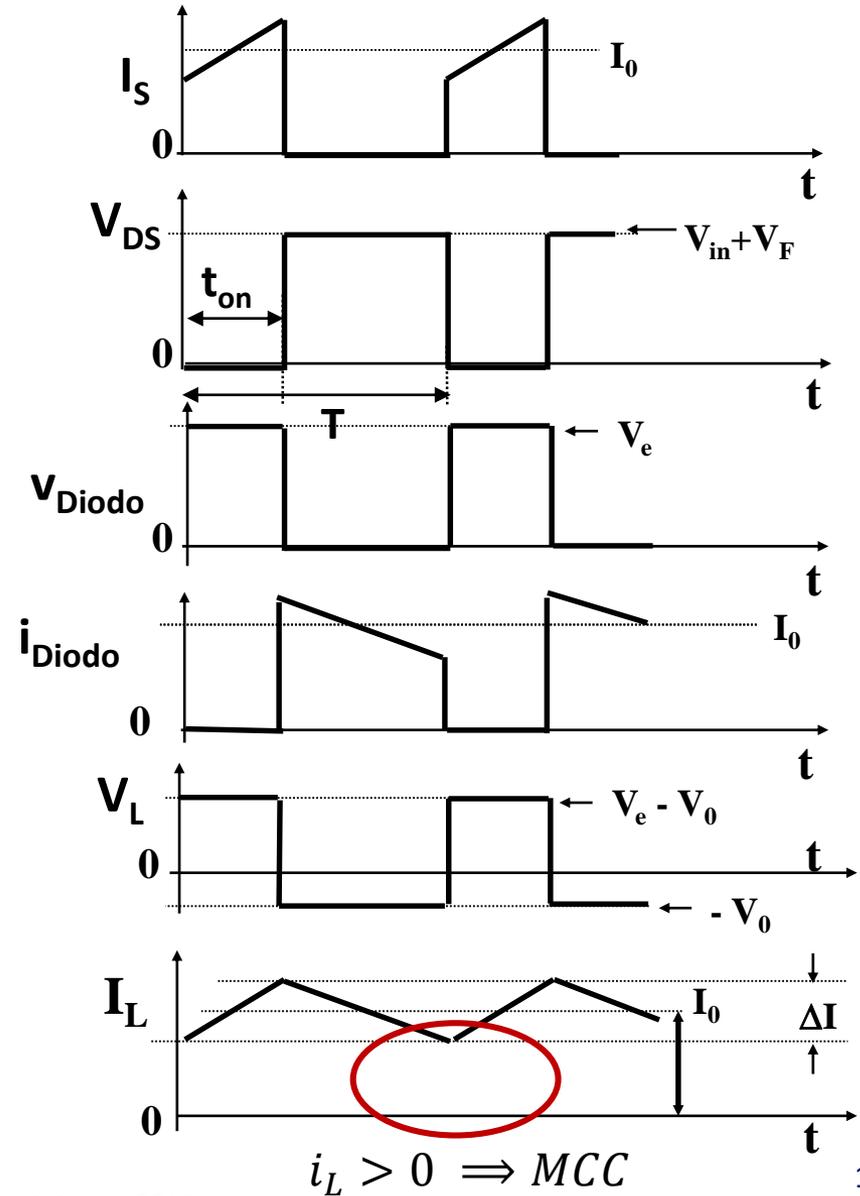
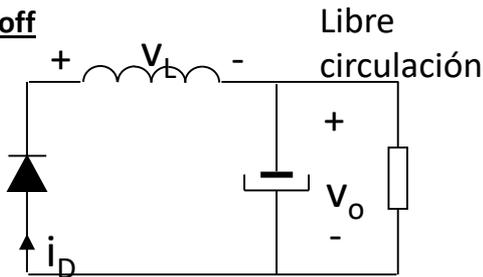
La corriente por la inductancia no se anula



S cerrado: T_{on}

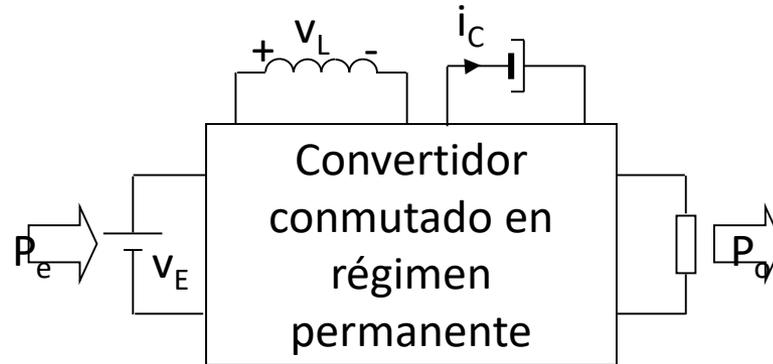


S abierto: T_{off}



Condiciones de régimen permanente (I)

- Esquema general de los convertidores conmutados:
 - Elementos que almacenan energía (bobinas y condensadores)
 - Interruptores en conmutación

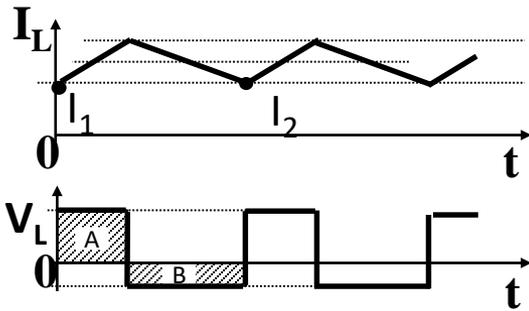


- Condiciones de régimen permanente en los elementos que almacenan energía:
 - Bobina: la tensión media en la bobina es nula $\bar{i}_L = 0$
 - Condensador: la corriente media en el condensador es nula $\bar{v}_c = 0$

Condiciones de régimen permanente (II)

- Elementos que almacenan energía
 - Bobina

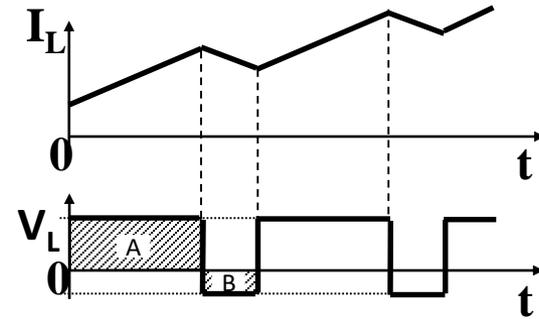
Régimen permanente:



La corriente en la bobina empieza y termina en el mismo punto $I_1 = I_2$

Balance de voltios por segundo $\overline{v_L} = 0$
Área A = Área B

Régimen transitorio:

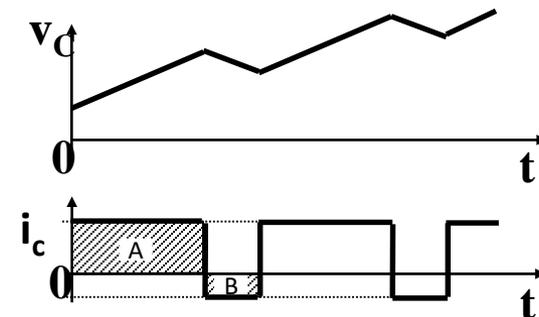


Si $\overline{v_L} \neq 0$,
 i_L crece

- Condensador

De forma análoga, la condición de régimen permanente es $\overline{i_C} = 0$
Área A = Área B

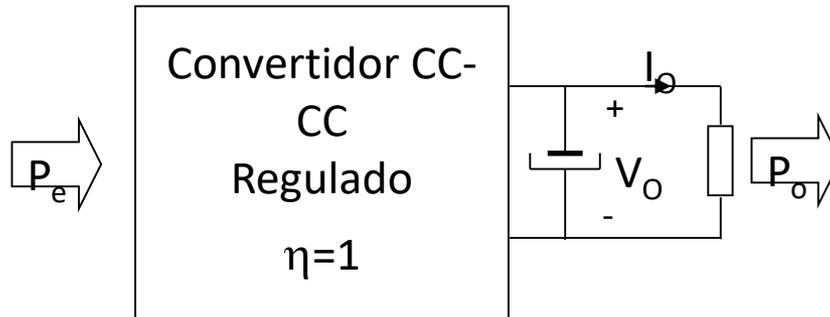
Régimen transitorio:



Si $\overline{i_C} \neq 0$,
 v_C crece

Condiciones de régimen permanente (III)

- Interruptores en conmutación
 - Considerando que idealmente en los interruptores no conviven tensión y corriente, y que el resto de elementos almacenan energía pero no la consumen, para el análisis se puede suponer un convertidor sin pérdidas ($\eta = 1$): $P_e = P_o$



- Resumen condiciones régimen permanente

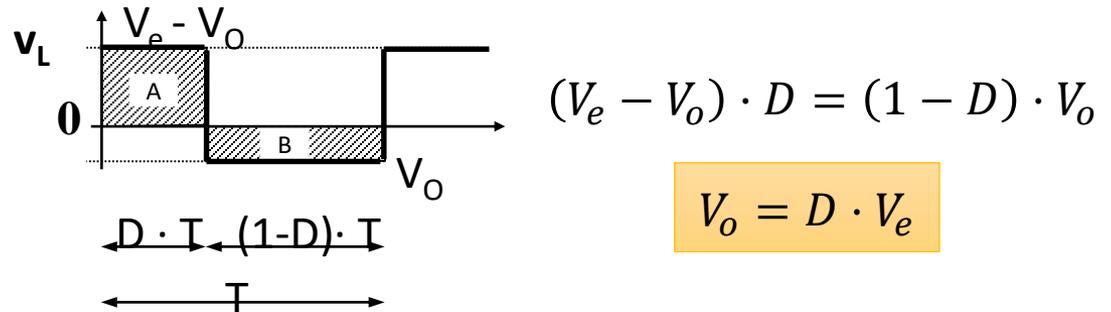
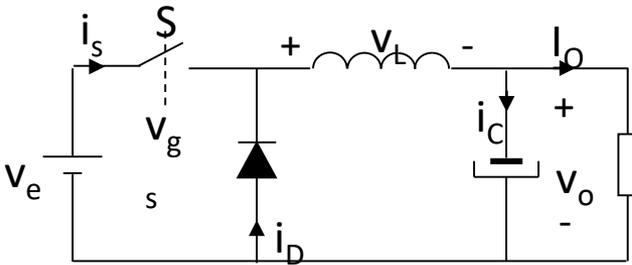
$$\overline{v_L} = 0$$

$$\overline{i_C} = 0$$

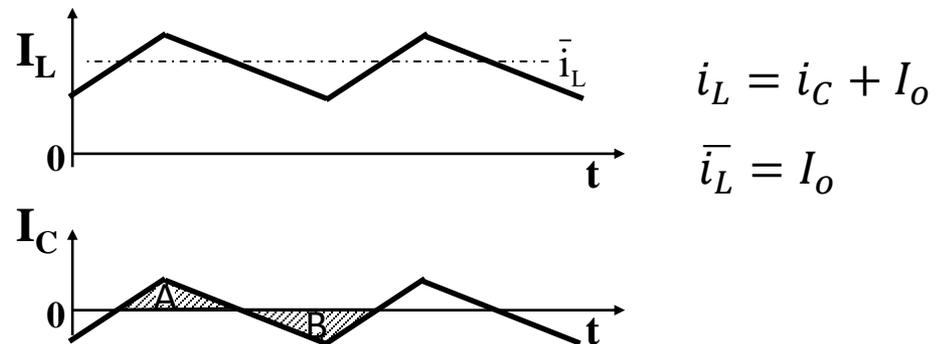
$$P_e = P_o$$

Convertidor reductor: análisis en MCC (I)

- Condición de régimen permanente en la bobina: $\overline{v_L} = 0$



- Condición de régimen permanente en la bobina: $\overline{i_C} = 0$

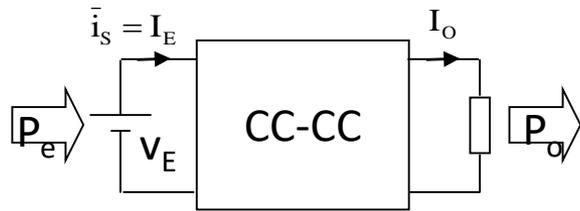


Convertidor reductor: análisis en MCC (II)

- Balance de potencia: $P_e = P_o$

$$\left. \begin{array}{l} P_E = V_E \cdot \bar{i}_S \\ P_O = V_O \cdot I_O \end{array} \right\} P_E = P_O \Rightarrow V_E \cdot \bar{i}_S = V_O \cdot I_O \Rightarrow \bar{i}_S = I_O \cdot \frac{V_O}{V_E} \Rightarrow \bar{i}_S = I_O \cdot D$$

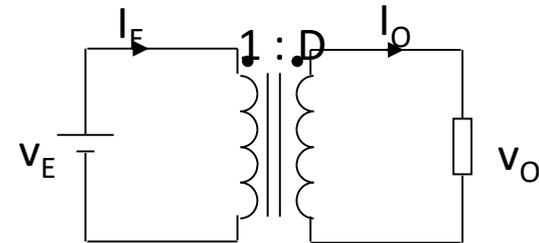
- Sistema equivalente al convertidor reductor:



$$V_O = V_E \cdot D$$

$$I_O = I_E \cdot \frac{1}{D}$$

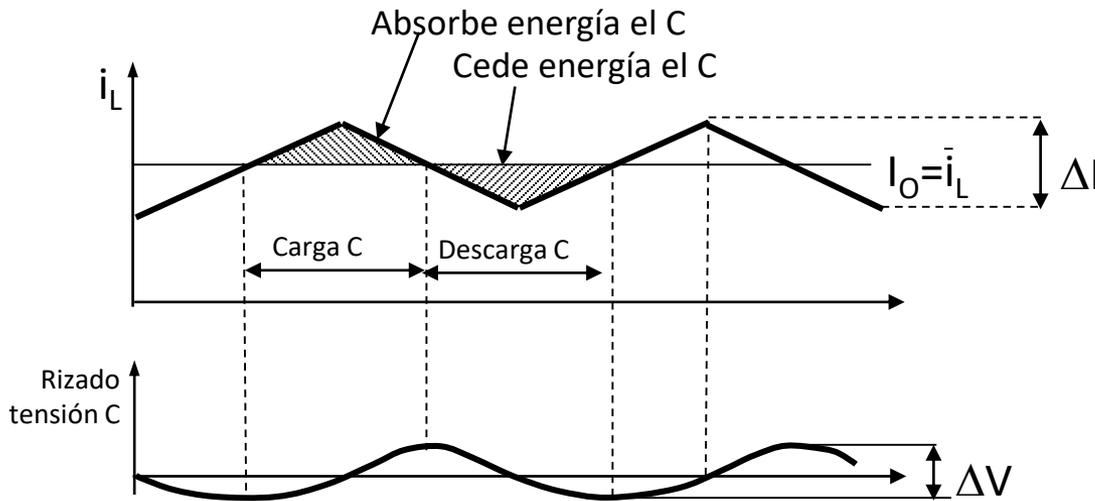
$$\bar{i}_S = I_E$$



Transformador ideal de C.C.

Convertidor reductor: condensador salida

- Hay que diseñar el condensador de salida para cumplir con la especificación de rizado de tensión a la salida ΔV
 - Diseño del condensador de salida basado en el análisis de su carga:



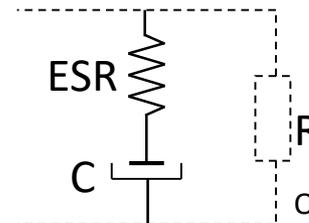
$$Q = C \cdot V$$

$$Q = \int i(t) \cdot dt$$

$$Q = i \cdot t = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{\Delta I}{2}$$

$$C = \frac{\Delta I}{8 \cdot \Delta V \cdot f_s}$$

- El condensador real tiene una resistencia serie equivalente ESR que tendrá un efecto en el rizado

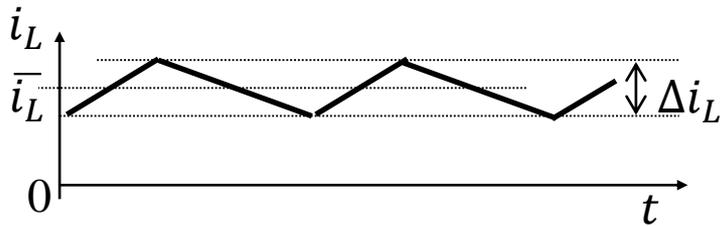


$$\Delta V = \Delta I \cdot ESR$$

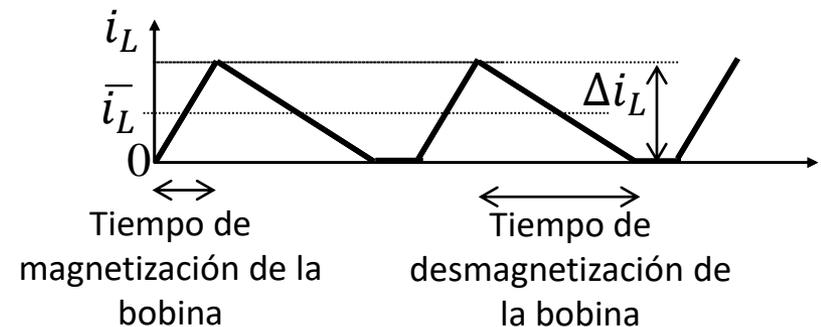
Modo de conducción discontinuo

- Sucede cuando la corriente por la bobina es igual a cero en algún instante:
 - Aparece un circuito equivalente adicional
 - Hay que calcular el tiempo de desmagnetización de la bobina

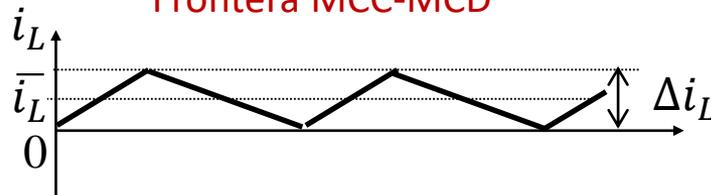
MCC: modo de conducción continuo



MCD: modo de conducción discontinuo



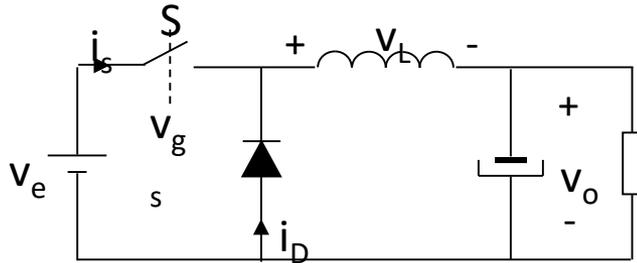
Frontera MCC-MCD



Convertidor reductor: formas de onda MCD

MCD: modo de conducción discontinuo

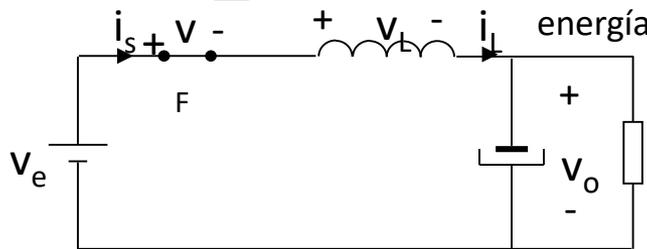
La corriente por la inductancia se anula



S cerrado: T_{on}

Transferencia de energía directa

1



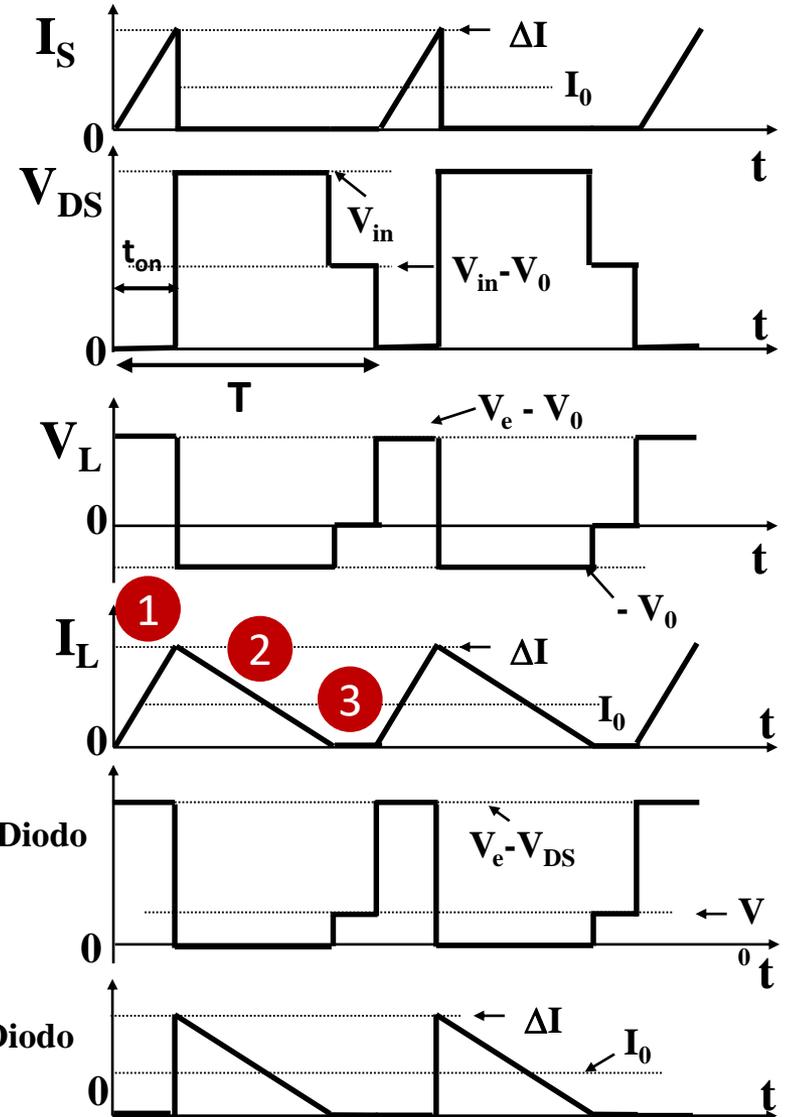
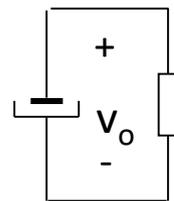
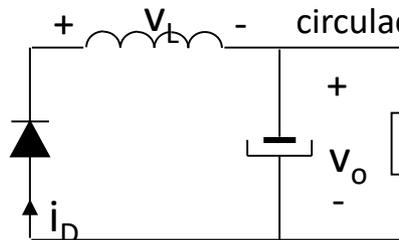
S abierto: T_{off}

Libre circulación

Tiempo muerto

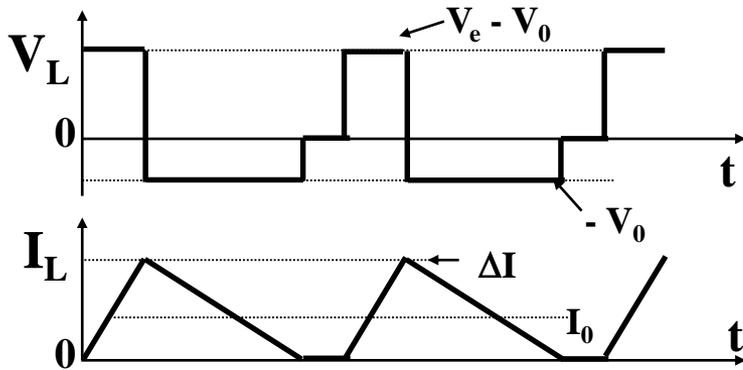
2

3



Convertidor reductor: análisis en MCD

- Condiciones de régimen permanente:



$$\bar{v}_L = 0 \quad \Leftrightarrow \quad (V_e - V_o) \cdot d = V_o \cdot d' \quad (1)$$

$$\bar{i}_C = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \bar{i}_L = I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (2)$$

$$P_E = P_o \quad \Leftrightarrow \quad V_E \cdot \bar{i}_S = V_o \cdot I_o \quad (3)$$

- Resolución del sistema:

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ y } (2) &\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot I_{pk} \cdot d \cdot V_e = \frac{V_o^2}{R_o} \\ (3) &\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot I_{pk} \cdot d \cdot V_e = \frac{V_o^2}{R_o} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left(\frac{R_o \cdot T}{2 \cdot L} \right) \cdot d^2 \cdot (V_o - V_e) \cdot V_e = V_o^2 \quad (4)$$

$$\frac{1}{K}$$

Parámetro adimensional de carga

Parámetro adimensional de carga K

- Definición:

$$K = \frac{2 \cdot L}{R_o \cdot T}$$

Inductancia

$T = \frac{1}{f_s}$ → Frecuencia de conmutación

Carga

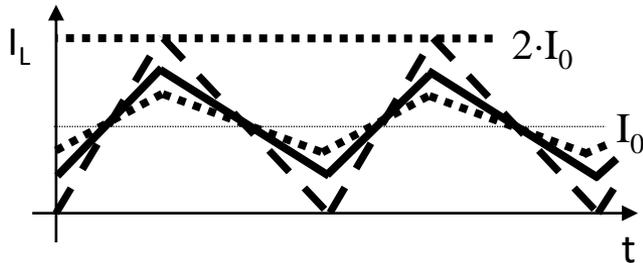
- Es adimensional y tiene la misma expresión para todos los convertidores que se van a estudiar en este curso
- Permite analizar con facilidad del modo de conducción del convertidor

Análisis del modo de conducción

- Para determinar al modo de conducción hay dos posibilidades:
 1. Comparando valor medio y rizado de corriente por la bobina
 - Suponer MCC: calcular d , i_L y Δi_L
 - Comparar el valor de medio de corriente por la bobina con su rizado:
 - Si $\frac{\Delta I_L}{2} < \bar{i}_L$ es MCC
 - Si $\frac{\Delta I_L}{2} = \bar{i}_L$ es MCC
 - Si $\frac{\Delta I_L}{2} > \bar{i}_L$ es MCD \rightarrow hay recalculer d y Δi_L
 2. Empleando el factor de carga K
 - Para cada convertidor se puede calcular un valor de K crítico que identifica el cambio de modo de conducción:
 - $K > K_{crit}$ \rightarrow Modo de conducción continuo
 - $K = K_{crit}$ \rightarrow Frontera entre los modos de conducción
 - $K < K_{crit}$ \rightarrow Modo de conducción discontinuo

Condiciones MCD (I)

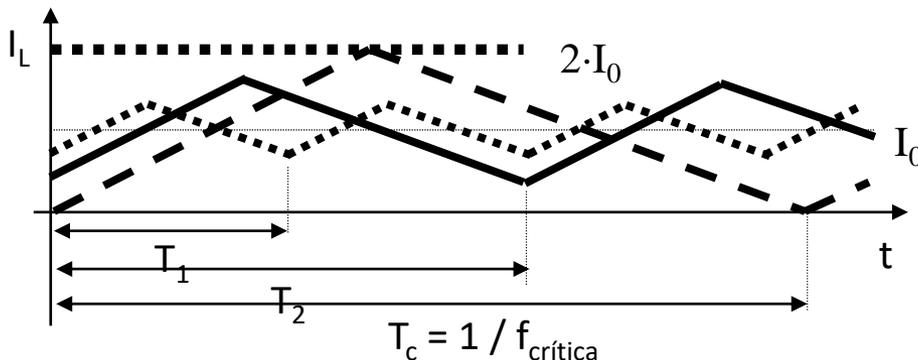
- En un diseño con mayor inductancia aumentan las pendientes y por tanto el rizado de corriente



$$\Delta I_L = 2I_0 = \frac{V_o \cdot (1 - D) \cdot T}{L_{crítica}}$$

$$L_{crítica} = \frac{(1 - D) \cdot V_o}{2 \cdot I_o \cdot f_s}$$

- En un diseño con menor frecuencia de conmutación aumentan los tiempos en los que la corriente sube y baja, incrementando el rizado de corriente

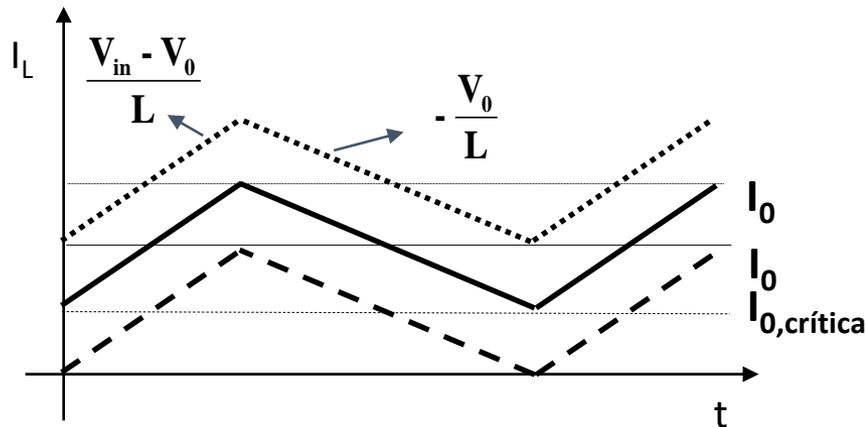


$$\Delta I_L = 2I_0 = \frac{V_o \cdot (1 - D) \cdot T_{crítico}}{L}$$

$$f_{crítica} = \frac{(1 - D) \cdot V_o}{2 \cdot L \cdot I_o}$$

Condiciones MCD (II)

- Al aumentar el valor de la resistencia de carga, es decir, reducir la potencia demandada, disminuye el valor medio de la corriente por la bobina



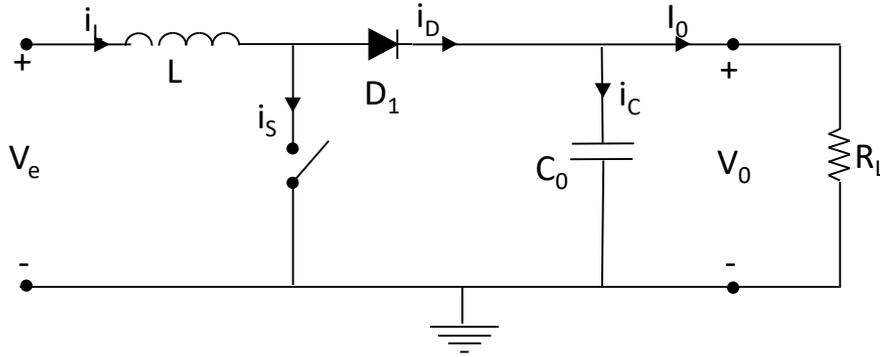
$$\Delta I_L = 2I_{0,critica} = \frac{V_0 \cdot (1 - D) \cdot T}{L}$$

$$R_{critica} = \frac{V_0}{I_{0,critica}} = \frac{2 \cdot L \cdot f_s}{1 - D}$$

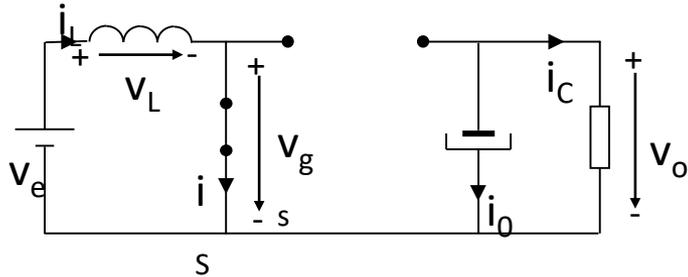
Índice tema

- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

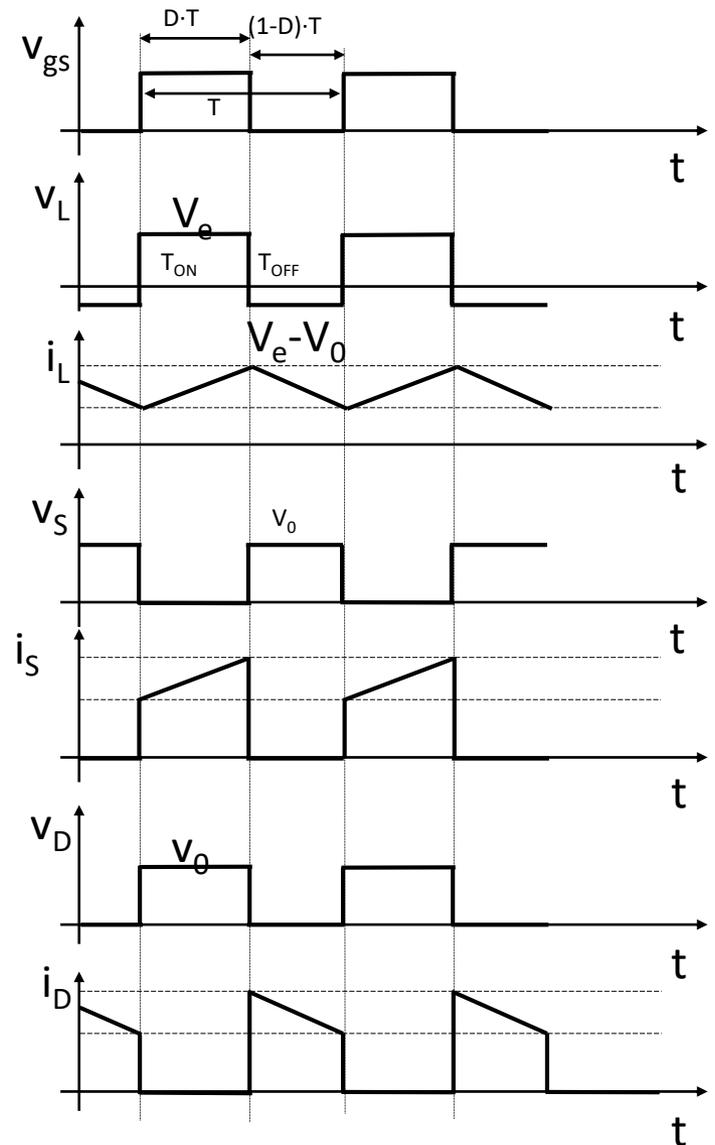
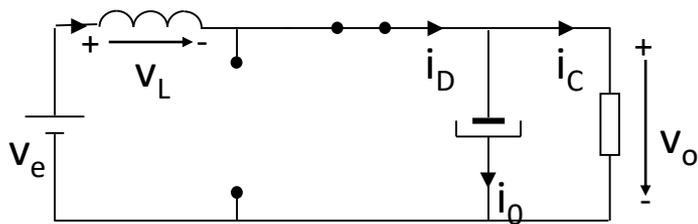
Convertidor elevador: formas de onda MCC



S cerrado: T_{ON}

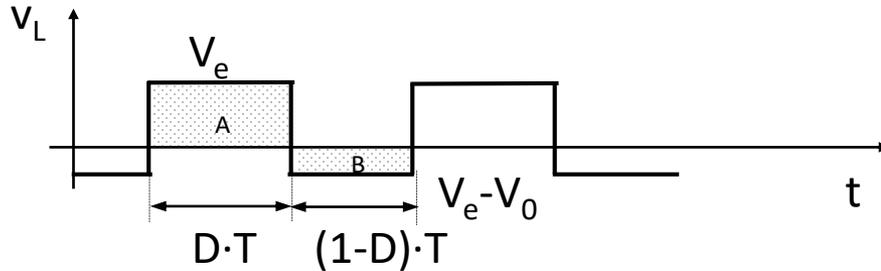


S abierto: T_{OFF}



Convertidor elevador: análisis en MCC

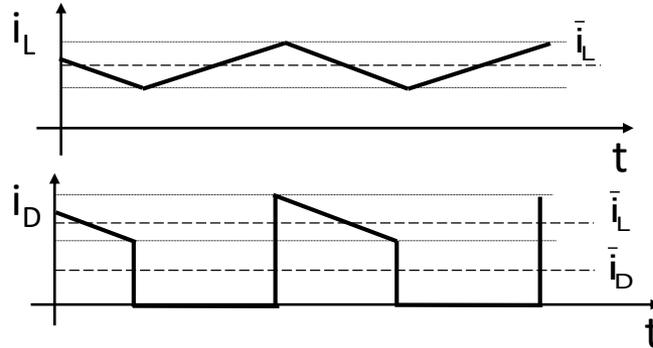
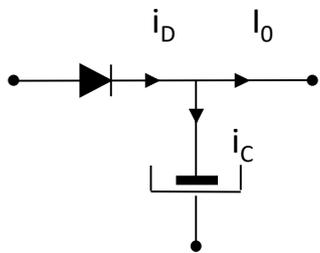
- Condición de régimen permanente en la bobina: $\overline{v_L} = 0$



$$V_e \cdot D = (V_o - V_e) \cdot (1 - D)$$

$$V_o = V_e \cdot \frac{1}{1 - D}$$

- Condición de régimen permanente en la bobina: $\overline{i_C} = 0$



$$i_D = i_C + I_o$$

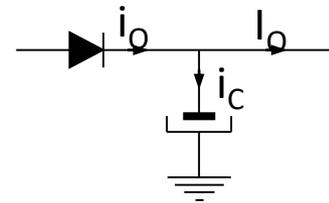
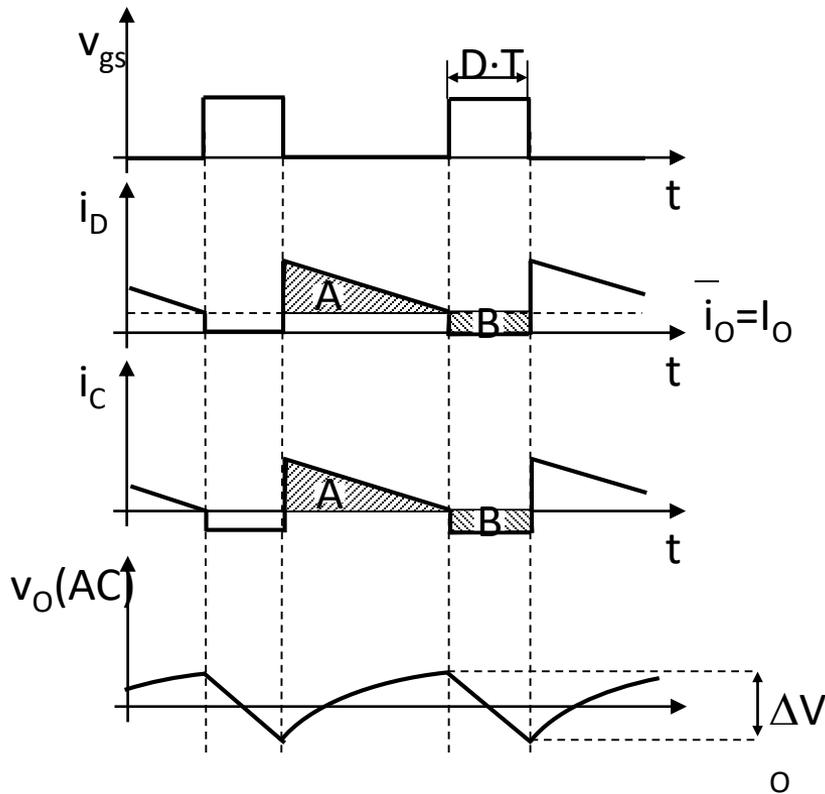
$$\overline{i_D} = I_o$$

- Balance de potencia: $P_e = P_o$

$$V_e \cdot \overline{i_L} = V_o \cdot I_o$$

$$\overline{i_L} = \frac{1}{1 - D} \cdot I_o$$

Convertidor elevador: condensador salida

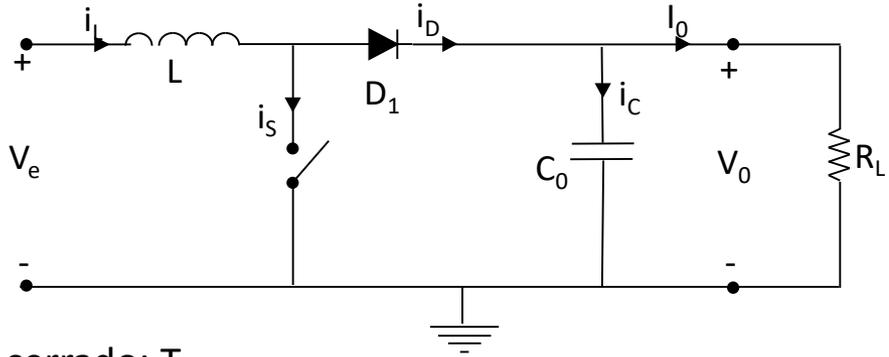


$$\left. \begin{aligned} i_C &= i_D - I_o \\ \bar{i}_C = 0 &\Rightarrow I_o = \bar{i}_C \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_C = i_D - \bar{i}_D$$

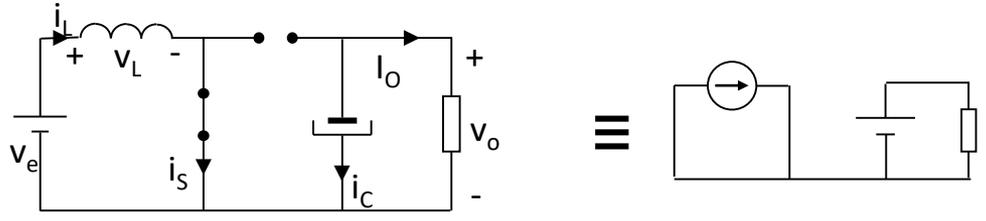
$$\Delta v_o = \frac{1}{C} \cdot \Delta Q = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_C(t) \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot I_o \cdot D \cdot T$$

$$C = \frac{I_o \cdot D \cdot T}{\Delta V}$$

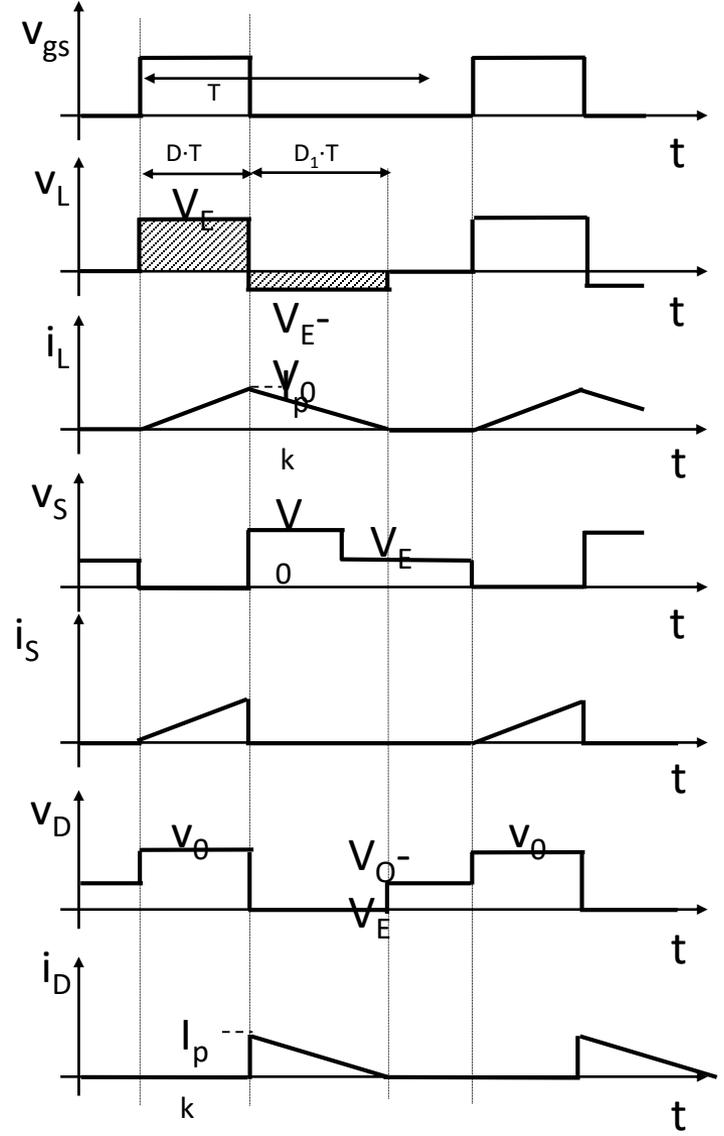
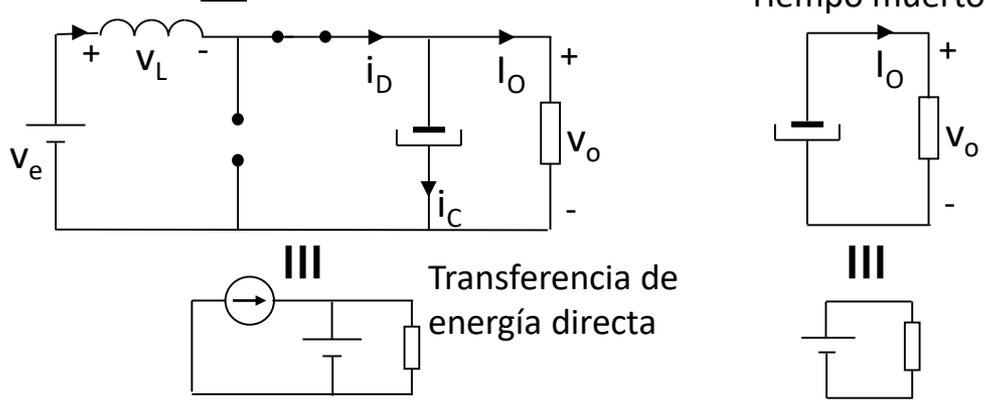
Convertidor elevador: formas de onda MCD



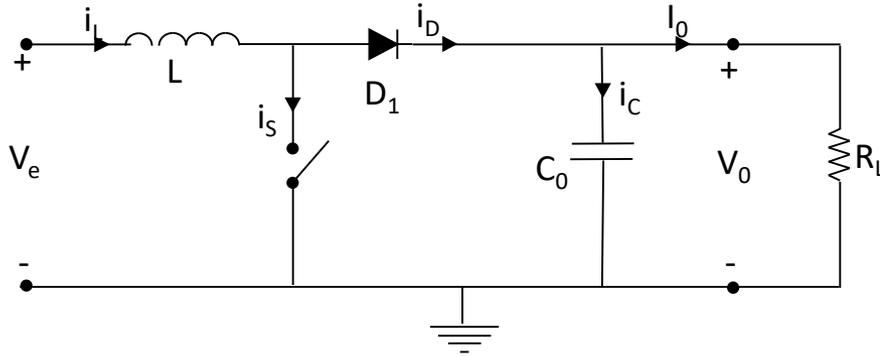
S cerrado: T_{ON}



S abierto: T_{OFF}



Convertidor elevador: análisis en MCD



Balance de potencias:

$$P_e = P_s \Rightarrow V_e \cdot \bar{i}_e = \frac{V_0^2}{R} \quad (1)$$

$$\bar{i}_e = \bar{i}_L = \frac{1}{2} \cdot i_p \cdot \left(\frac{T_{ON} + t'}{T} \right) \quad (2)$$

$$i_p = \frac{V_e}{L} \cdot T_{ON} \quad (3)$$

$$\bar{i}_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_e}{L} \cdot T_{ON} \cdot \left(\frac{T_{ON} + t'}{T} \right) \quad (4)$$

Balance Voltios x Segundo bobina:

$$V_e \cdot T_{ON} = (V_e - V_0) \cdot t' \Rightarrow t' = \frac{V_e}{V_e - V_0} \cdot T_{ON} \quad (5)$$

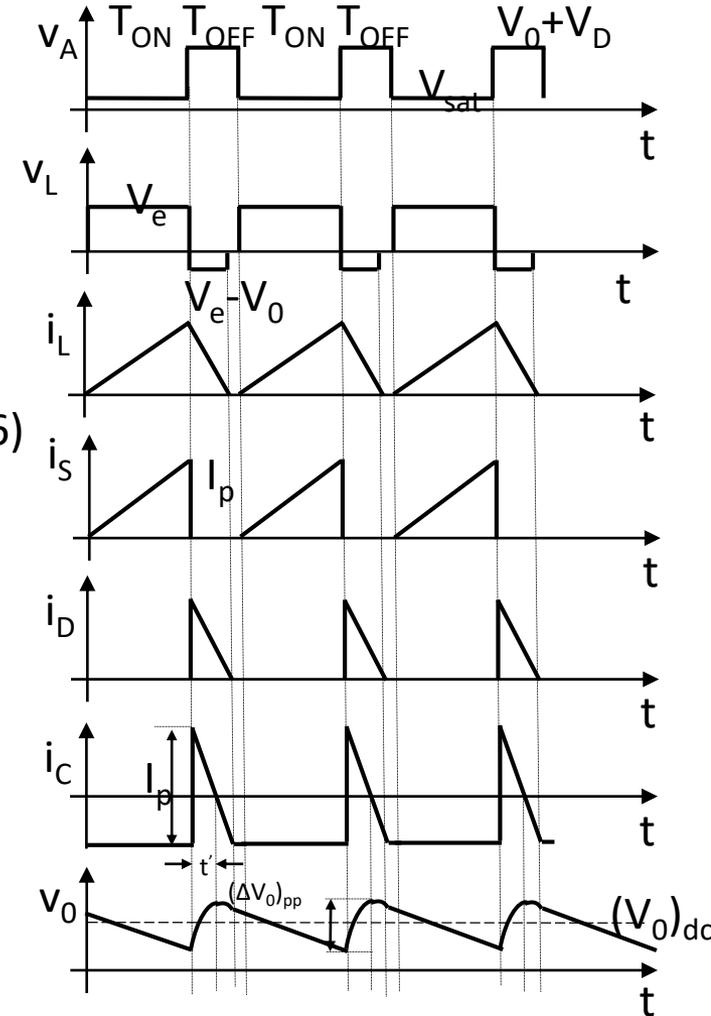
Sustituyendo (5) en (4):

$$\bar{i}_e = \frac{V_e \cdot T_{ON}^2}{2 \cdot L \cdot T} \cdot \left(1 + \frac{V_e}{V_e - V_0} \right) \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (1):

$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{1 \oplus \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{d^2}{K}}}{2}$$

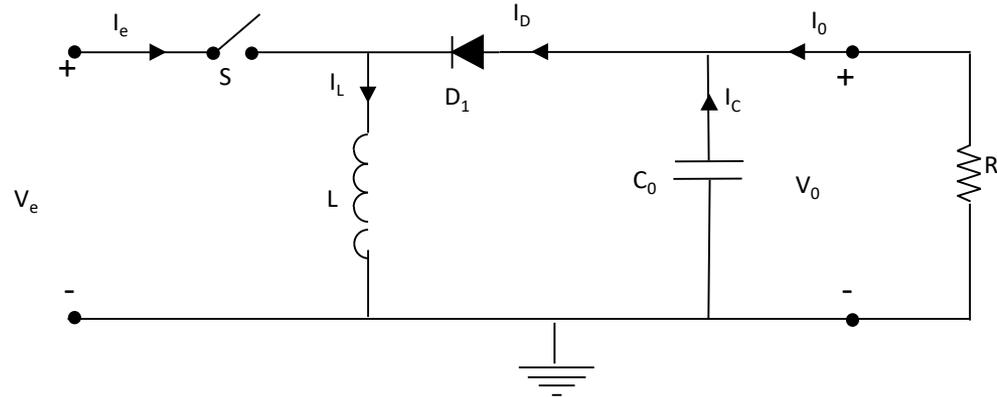
La solución considera signo positivo porque se trata de un convertidor con topología elevadora



Índice tema

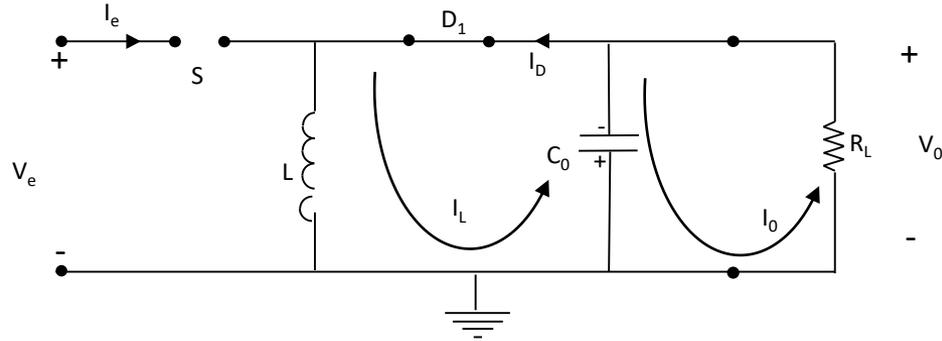
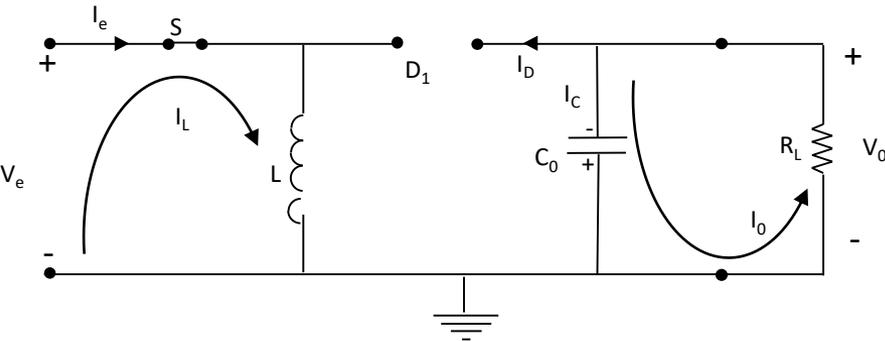
- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Convertidor reductor-elevador



T_{ON}

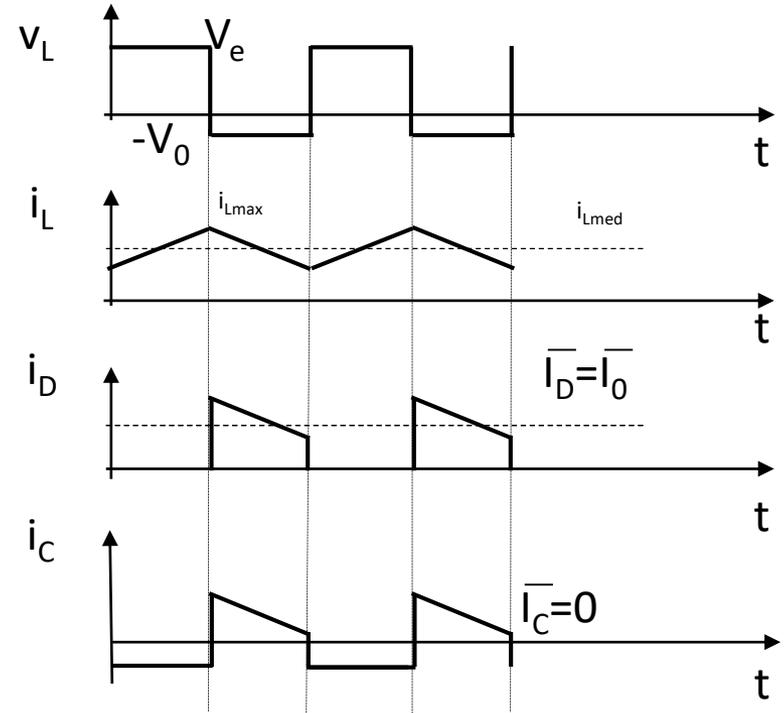
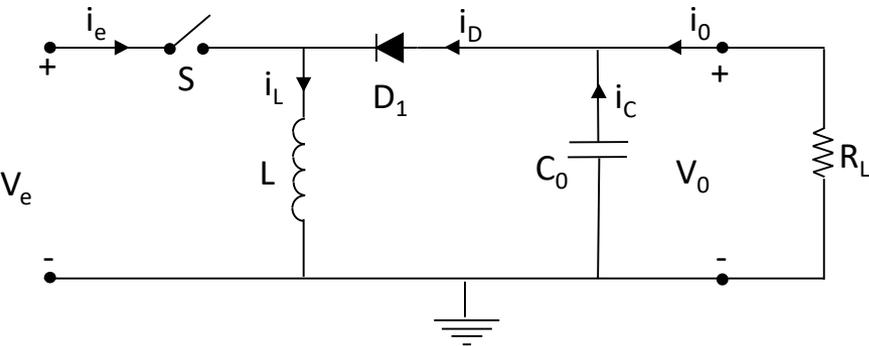
T_{OFF}



- Carga de L.
- Descarga de C.

- Descarga de L.
- Carga de C.

Reductor-elevador: análisis en MCC



Cálculo corriente máxima en la bobina:

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_D &= i_o \Rightarrow I_{Lmed} \cdot T_{OFF} = i_o \cdot T \\ I_{Lmed} &= \frac{i_o \cdot T}{T_{OFF}} = \frac{i_o}{1-d} \\ I_{Lmax} &= I_{Lmed} + \frac{\Delta I_L}{2} \\ \Delta I_L &= \frac{V_0}{L} \cdot T_{OFF} \end{aligned} \right\} I_{Lmax} = \frac{i_o}{1-d} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_0}{L} \cdot T_{OFF}$$

Balance Voltios x segundo:

$$V_e \cdot T_{ON} = V_0 \cdot T_{OFF}$$

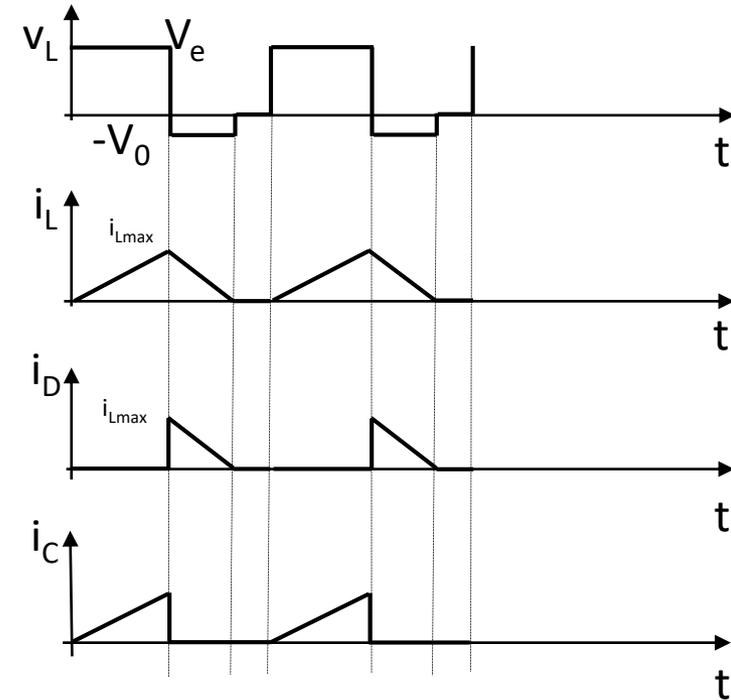
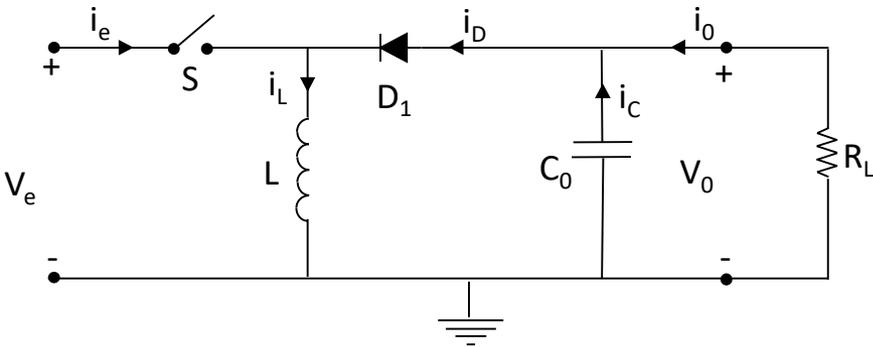
$$V_o = V_e \cdot \frac{D}{1-D}$$

$0 \leq D < 0,5$ Se cumple que $V_o < V_e$

$D = 0,5$ Se cumple que $V_o = V_e$

$0,5 < D < 1$ Se cumple que $V_o > V_e$

Reductor-elevador: análisis en MCD



Balance de potencias:

$$\left. \begin{aligned}
 P_e = P_s &\Rightarrow V_e \cdot \bar{i}_e = \frac{V_0^2}{R} \\
 \bar{i}_e &= \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ON}}{T} \cdot I_{max} \\
 I_{max} &= \frac{V_e \cdot T_{ON}}{L}
 \end{aligned} \right\} \bar{i}_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ON}}{T} \cdot \frac{V_e}{L} \cdot T_{ON}$$

$$\frac{V_0^2}{R} = V_e \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T_{ON}^2}{T} \cdot \frac{V_e}{L}$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{d}{\sqrt{K}}$$

Reductor-elevador: análisis

- Frontera modo de conducción continuo y discontinuo:

$$\left. \begin{array}{l} \text{MCC} \quad \frac{V_0}{V_e} = \frac{d}{1-d} \\ \text{MCD} \quad \frac{V_0}{V_e} = \frac{d}{\sqrt{K}} \end{array} \right\} \frac{d}{1-d} = \frac{d}{\sqrt{K}} \Rightarrow K_{\text{crit}} = (1-d)^2$$

$K > K_{\text{crit}} \rightarrow \text{MCC}$
 $K = K_{\text{crit}} \rightarrow \text{Frontera MCC-MCD}$
 $K < K_{\text{crit}} \rightarrow \text{MCD}$

- Cálculo condensador de salida:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q = \int i_C(t) \cdot dt = I_o \cdot T_{\text{ON}} \\ \Delta Q = C \cdot \Delta V_{\text{pp}} \end{array} \right\} C = \frac{I_o \cdot T}{\Delta V}$$

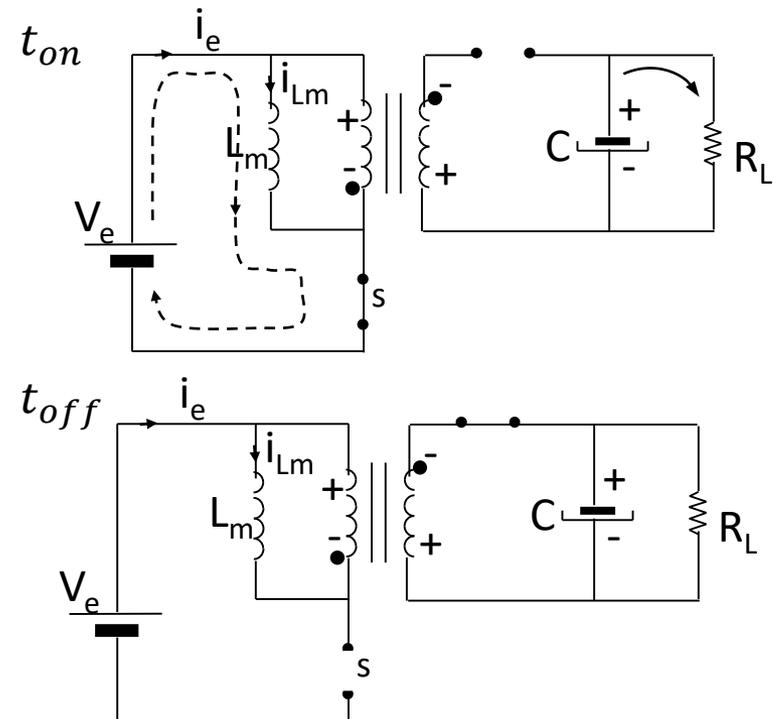
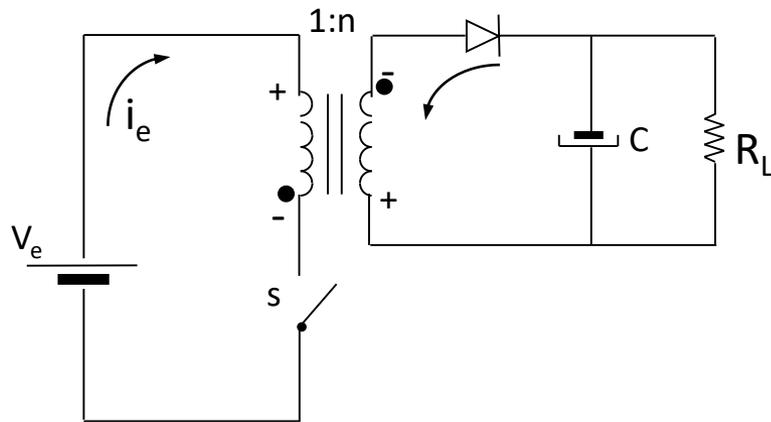
A partir de las especificaciones del rizado se determina la capacidad necesaria

Índice tema

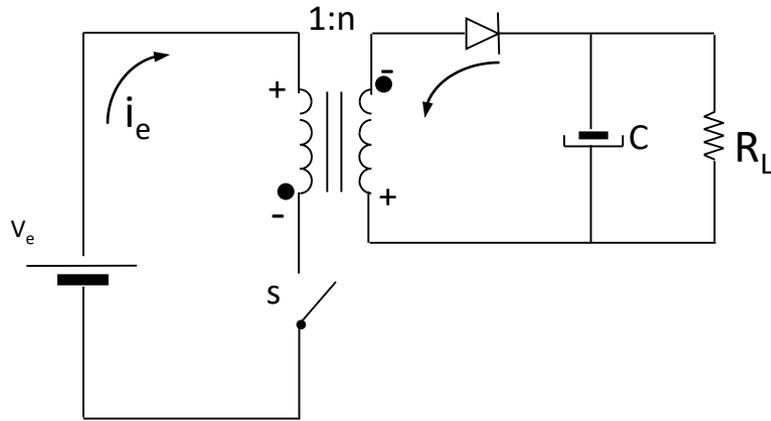
- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Convertidor flyback

- Topología con aislamiento galvánico derivada del convertidor reductor-elevador
- Su funcionamiento se fundamenta en el almacenamiento de energía en la inductancia magnetizante del transformador



Convertidor flyback: formas de onda MCC



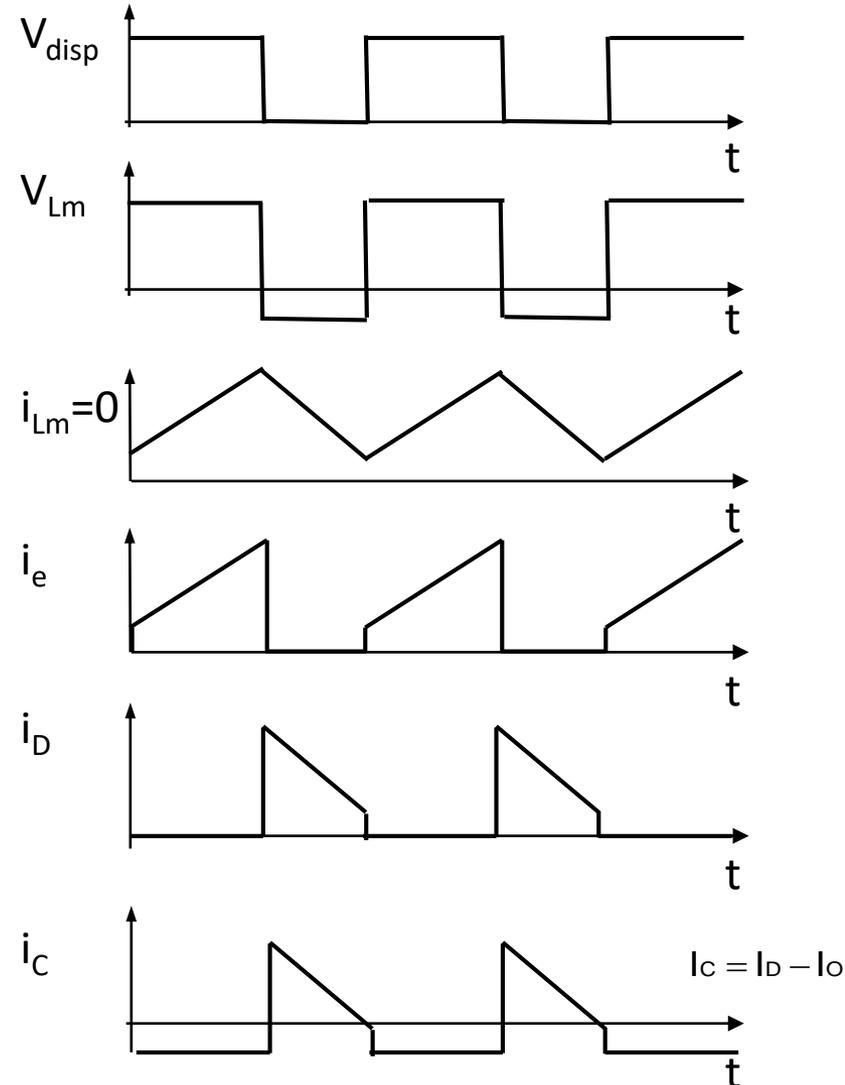
Balance Voltios x segundo:

$$V_e \cdot t_{on} = \frac{V_o}{n} \cdot t_{off}$$

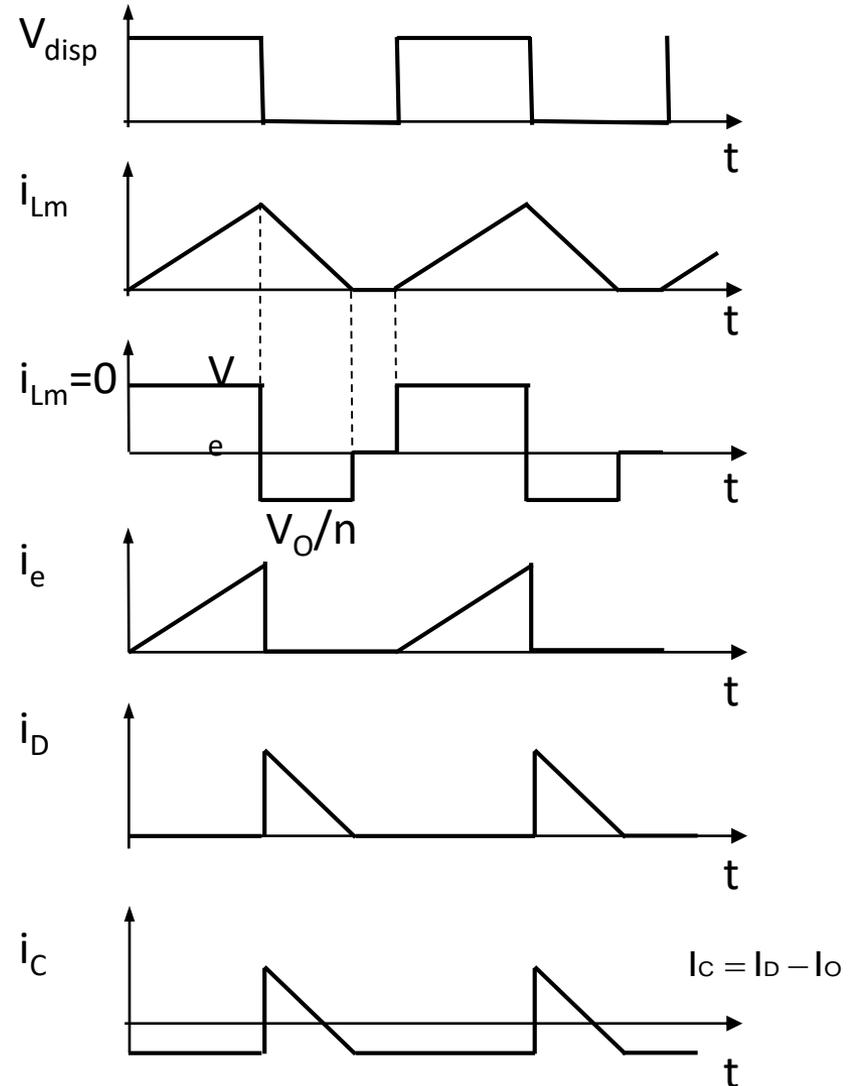
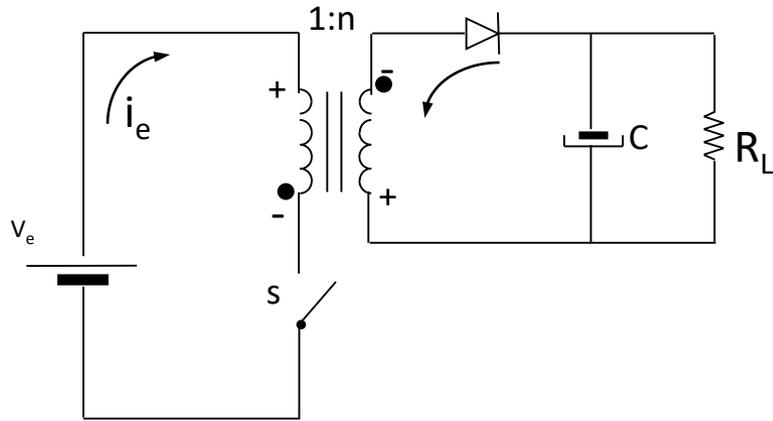
⇒

$$V_o = V_e \cdot n \cdot \frac{D}{1 - D}$$

Para $n = 1$, la relación de conversión es la misma que la del convertidor reductor-elevador pero sin invertir la salida



Convertidor flyback: formas de onda MCD



Balance potencia:

$$P_0 = P_e \Rightarrow \frac{V_0^2}{R} = V_e \cdot i_e$$

$$\left. \begin{aligned} i_e &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{ton}}{T} \cdot \Delta i \\ \Delta i &= \frac{V_e}{L} \cdot \text{ton} \end{aligned} \right\} i_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{ton}}{T} \cdot \frac{V_e}{L} \cdot \text{ton}$$

$$V_0 = V_e \cdot D \cdot \frac{1}{\sqrt{K}}$$

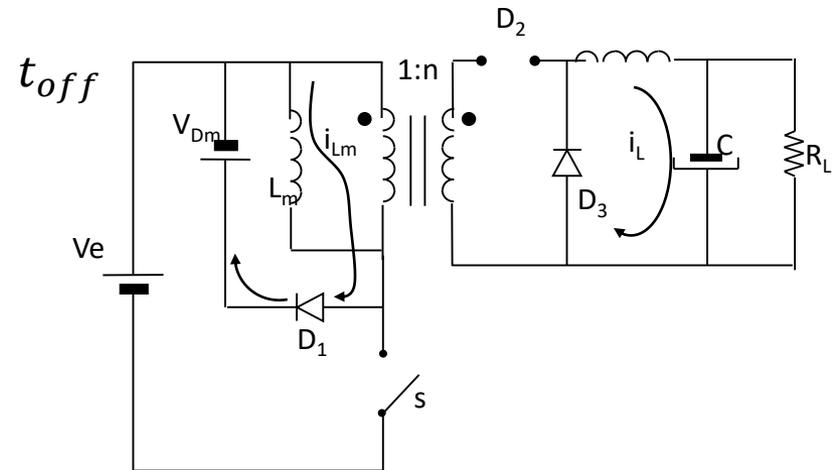
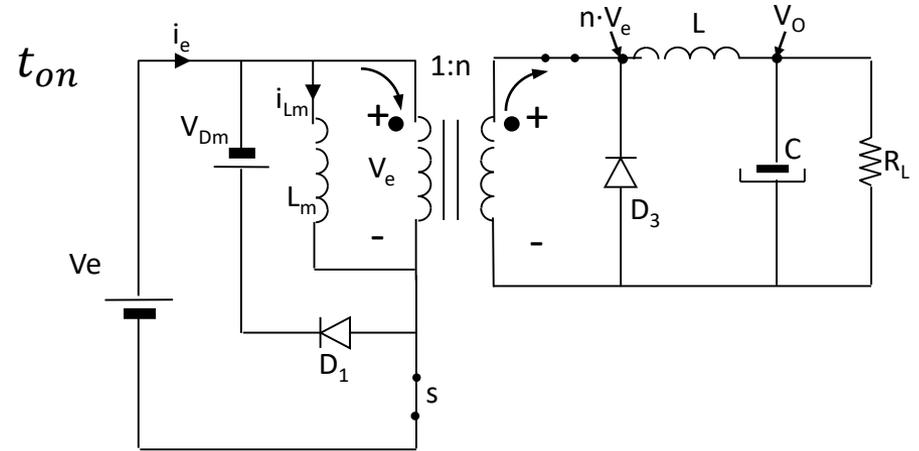
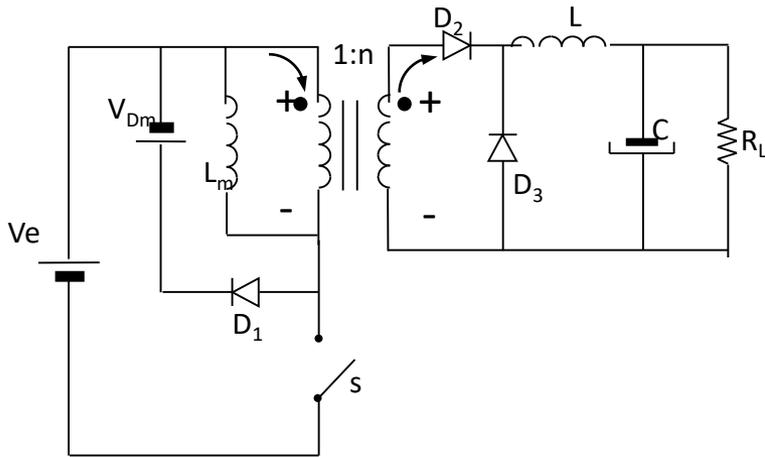
$$n \cdot \frac{d}{1-d} = \frac{d}{\sqrt{K}} \Rightarrow K_{\text{crítica}} = \left(\frac{1-d}{n} \right)^2$$

Índice tema

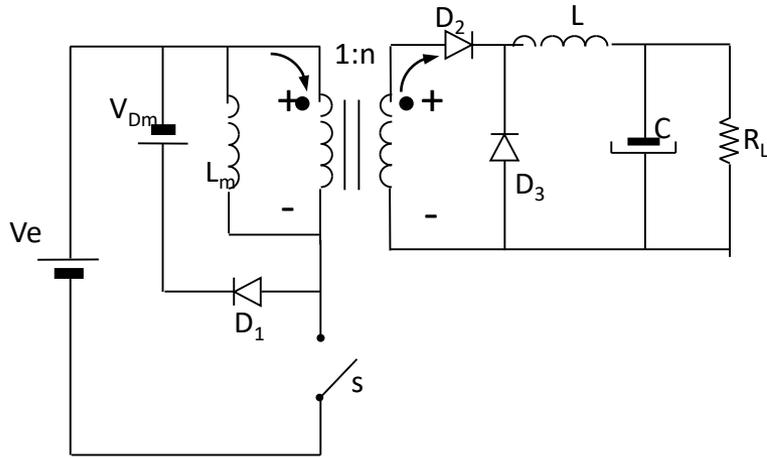
- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Convertidor forward

- Topología con aislamiento galvánico derivada del convertidor reductor



Convertidor forward: formas de onda MCC

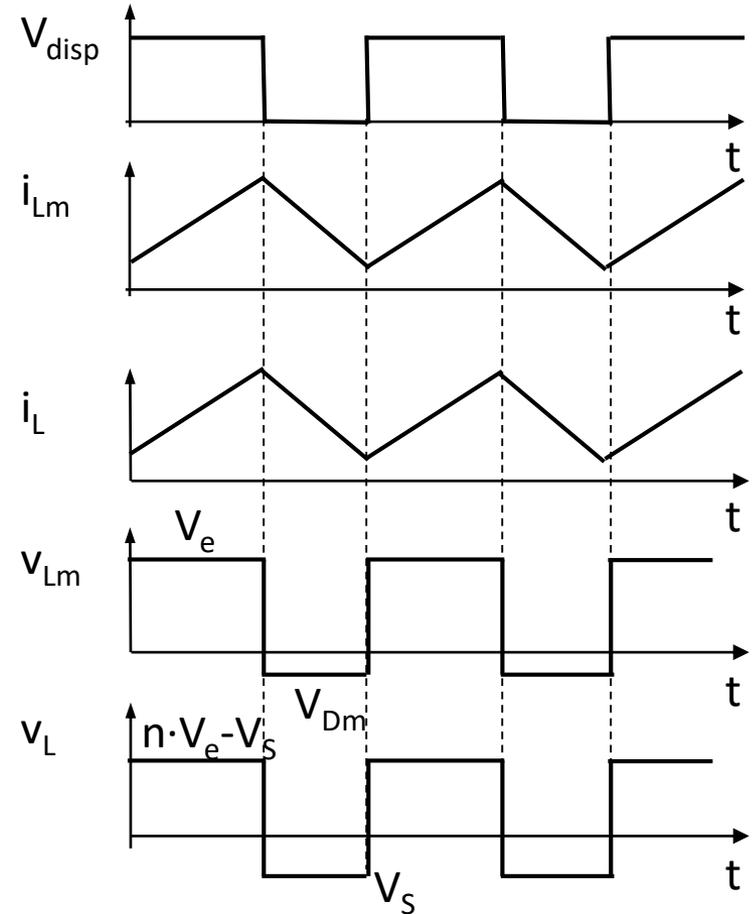


Balance Voltios x Segundo

$$(n \cdot V_e - V_o) \cdot t_{ON} = V_o \cdot t_{OFF} \Rightarrow V_o = V_e \cdot n \cdot D$$

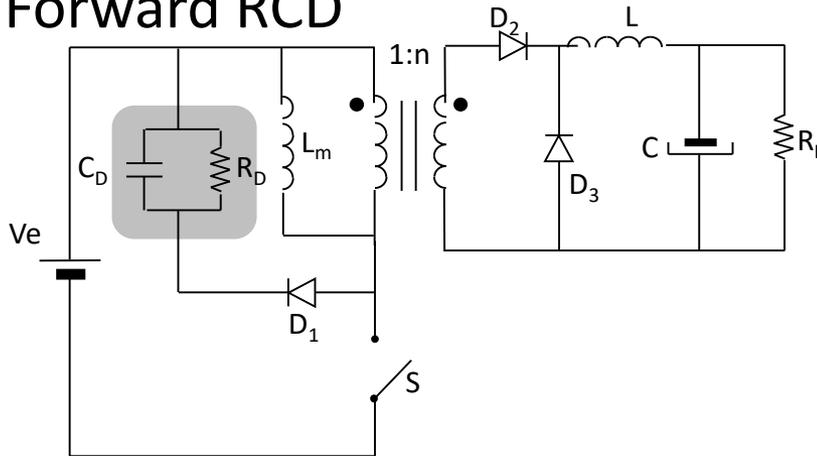
Además, para desmagnetizar el transformador se debe cumplir el balance voltios x segundo en la inductancia magnetizante:

$$V_e \cdot t_{ON} \leq V_{Dm} \cdot t_{OFF}$$



Convertidor forward: tipos desmagnetización

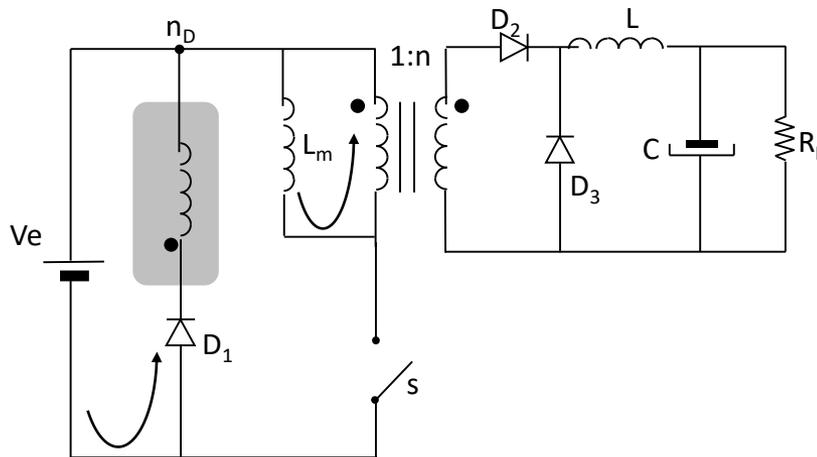
- Forward RCD



$R_D \Rightarrow$ Disipa energía extra que llega a C_D
 $C_D \Rightarrow$ Almacena energía hasta que su tensión llega a cumplir: $P_R = \frac{V_{C_D}^2}{R_D}$

Energía desmagnetización \Rightarrow disipada

- Forward clásico



$T_{OFF} \Rightarrow$ Corriente desmagnetizante reflejada por el secundario.

$$V_D = \frac{V_e}{n_D} \text{ N}^\circ \text{ vueltas secundario desmagnetizador}$$

Energía desmagnetización \Rightarrow devuelta a la fuente

Índice tema

- Introducción a las fuentes de alimentación lineales y conmutadas
- Clasificación de los convertidores CC/CC conmutados
- Convertidor reductor:
 - Formas de onda
 - Condiciones de régimen permanente
 - Análisis en modo de conducción continuo
 - Análisis en modo de conducción discontinuo
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor flyback
- Convertidor forward
- Resumen

Resumen (I)

- Funciones de Transferencia de los Convertidores Básicos:

Reductor

$$M_{MCC} = \frac{V_o}{V_e} = d$$

$$M_{MCD} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot K}{d^2}}}$$

$$K_{critica} = 1 - d$$

$$K_{critica} = 1 - M$$

$$K_{critica_max} = 1$$

Elevador

$$M_{MCC} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{1}{1 - d}$$

$$M_{MCD} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{K}}}{2}$$

$$K_{critica} = d \cdot (1 - d)^2$$

$$K_{critica} = \frac{M - 1}{M^3}$$

$$K_{critica_max} = \frac{4}{27}$$

Reductor-elevador

$$M_{MCC} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{d}{1 - d}$$

$$M_{MCD} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{d}{\sqrt{K}}$$

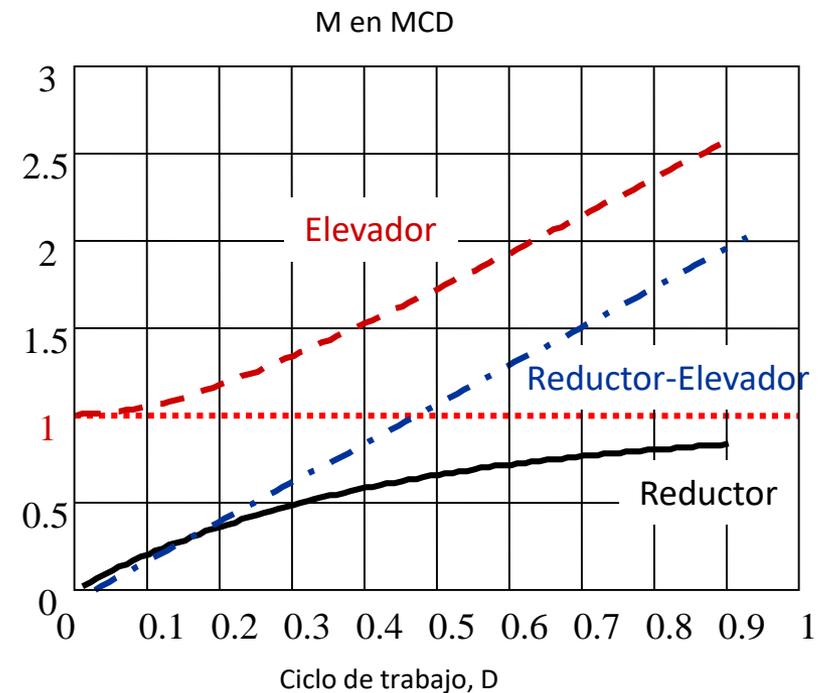
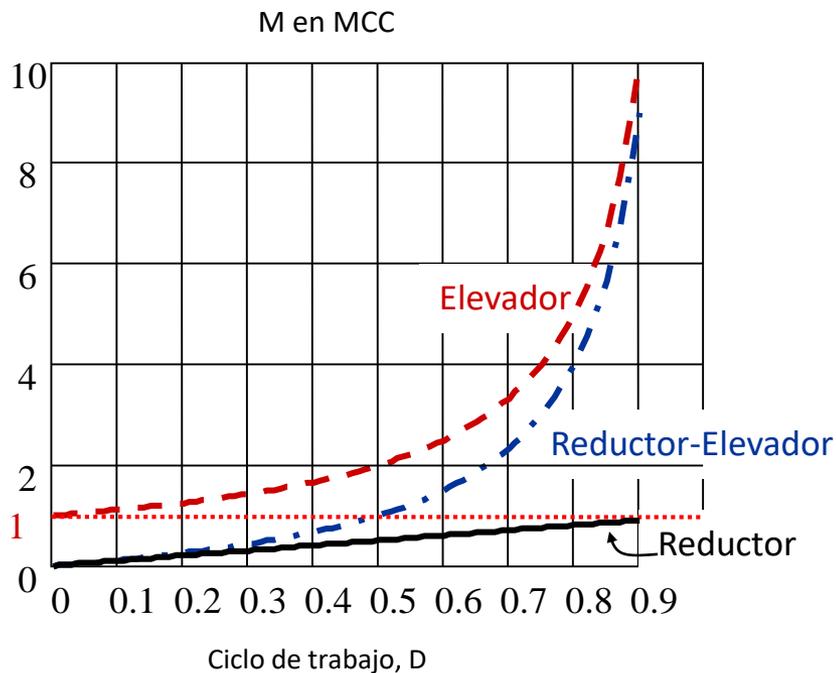
$$K_{critica} = (1 - d)^2$$

$$K_{critica} = \frac{1}{(1 + M)^2}$$

$$K_{critica_max} = 1$$

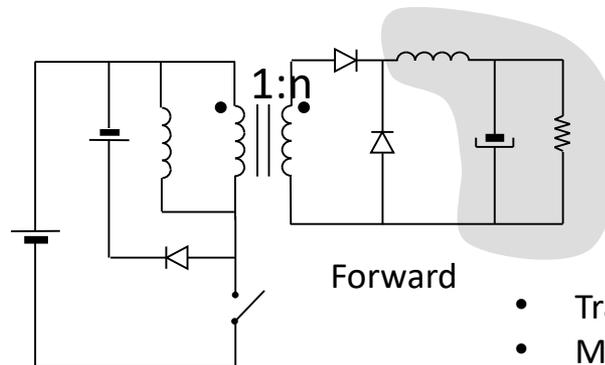
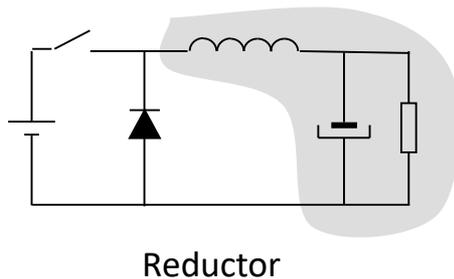
Resumen (II)

- Relaciones de tensiones en modo de conducción continuo y discontinuo:



Resumen (III)

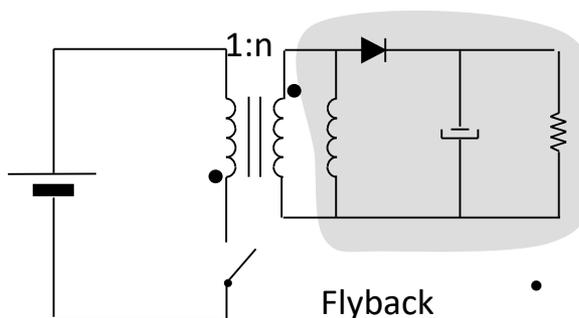
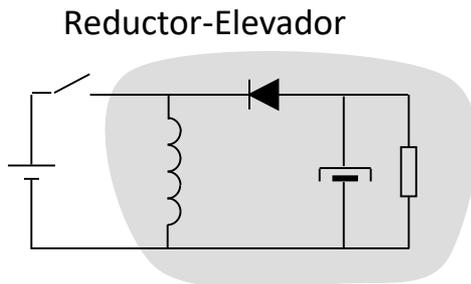
- Topologías reductoras:



Forward vs. flyback

- Transformador más pequeño
- Mayor rendimiento
- Menor ruido y rizado de V_o
- Menores niveles de corriente

- Topologías reductoras-elevadoras:



Flyback vs. forward

- Sencillo y barato
- Un único elemento magnético
- Apropiado para convertidores multisalida
- Mayor capacidad de regulación