



Universidad
de Oviedo

Lección11

Convertidores CC/CC

2ª Parte: Convertidores con Aislamiento

Sistemas Electrónicos de Alimentación

5º Curso. Ingeniería de Telecomunicación

Índice:

- Necesidad del aislamiento galvánico
- Convertidor Flyback
- Convertidor Forward
- Convertidor en Medio Puente
- Convertidor en Puente Completo
- Convertidor Push-Pull
- Aplicaciones

Necesidad de aislamiento galvánico

Como ya hemos visto, cada aplicación electrónica tiene unas tensiones típicas de alimentación. Por ejemplo:

- Telecomunicaciones: 48 V
- Microprocesadores: 3.3 V, 1.5 V...
- Equipos para automóviles (Radio, CD, etc): 12 V, 42 V.
- Equipos de audio: ± 70 V
- Circuitos digitales en general: 5 V, 12 V

Fuentes de energía primaria:

- la red eléctrica
- baterías
- células solares
- aerogeneradores



La más usada es la red eléctrica de baja tensión



Forma de tensión senoidal y 50 / 60 Hz

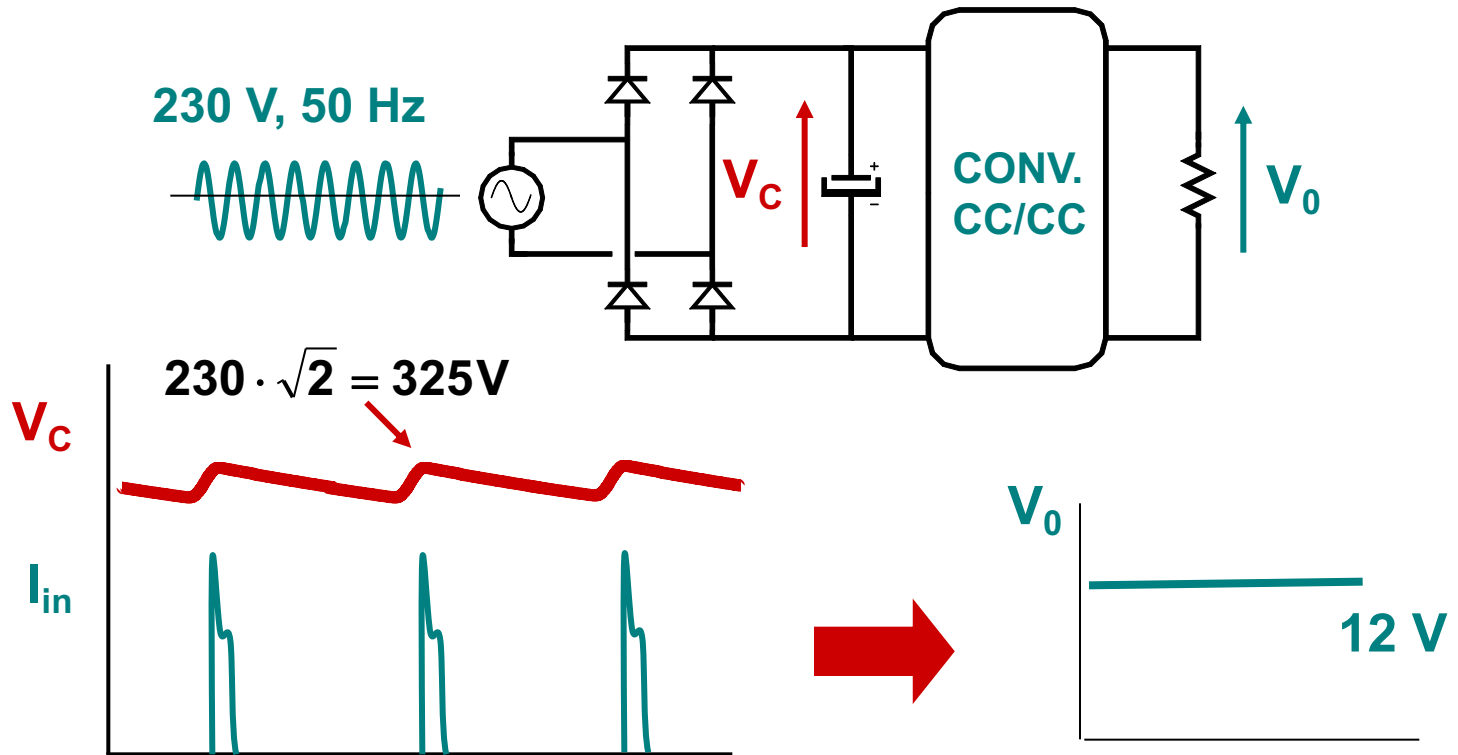
- Europa: 220 V, 230 V, 240 V (50 Hz)
- E.E.U.U.: 110 V (60 Hz)

Necesidad de aislamiento galvánico



Se necesita un convertidor CA/CC

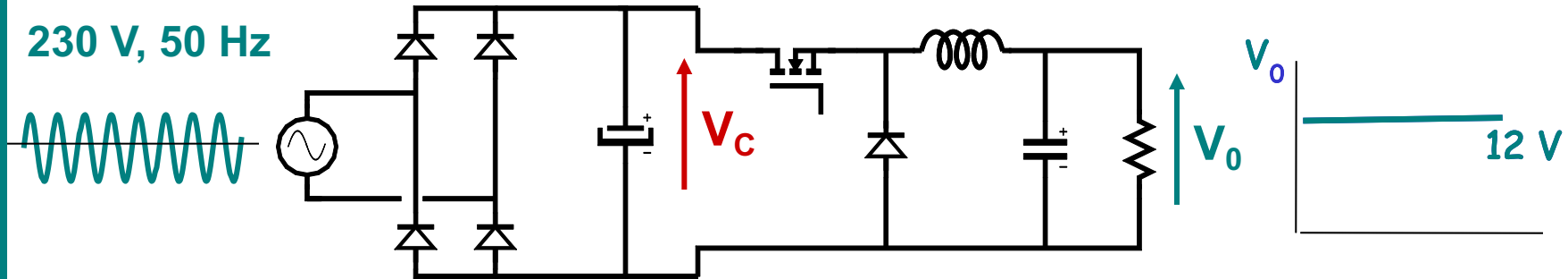
Por razones de coste, el circuito más usado en baja y media potencia es un simple puente de diodos con un filtro por condensador.



Para potencias elevadas (>10kW), la conversión CA/CC puede usar otras topologías.

Necesidad de aislamiento galvánico

Si utilizásemos un convertidor Reductor, tendríamos:



La tensión máxima de entrada sería 325 V: $\Rightarrow D = \frac{12}{325} = 0.036$



Un ciclo de trabajo tan bajo es muy complicado de obtener en la práctica. Además, el funcionamiento del convertidor sería muy malo.



Es necesario adaptar un poco las tensiones para no tener valores tan dispares entre la entrada y la salida.

Necesidad de aislamiento galvánico

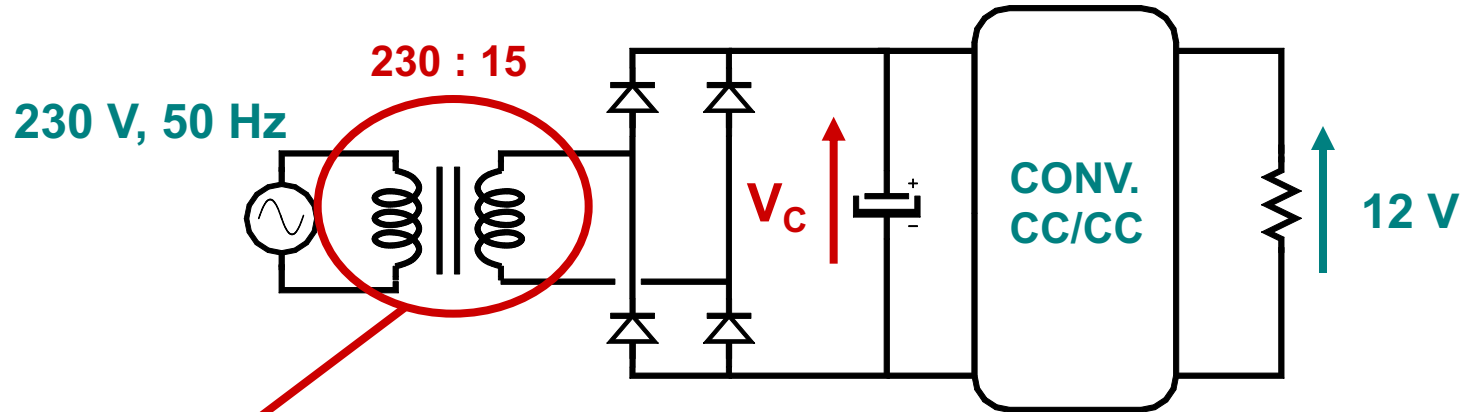


Para adaptar tensiones

Posible solución: usar un transformador de red



V_C puede tener un valor más cercano a V_{out}



Inconveniente: los transformadores de baja frecuencia (50 Hz) son muy voluminosos y muy pesados.

Por coste, podría interesar para potencias muy bajas (<10W), pero es impensable para potencias más elevadas.

Sin embargo, si hacemos que el transformador trabaje a alta frecuencia, su tamaño disminuirá drásticamente.

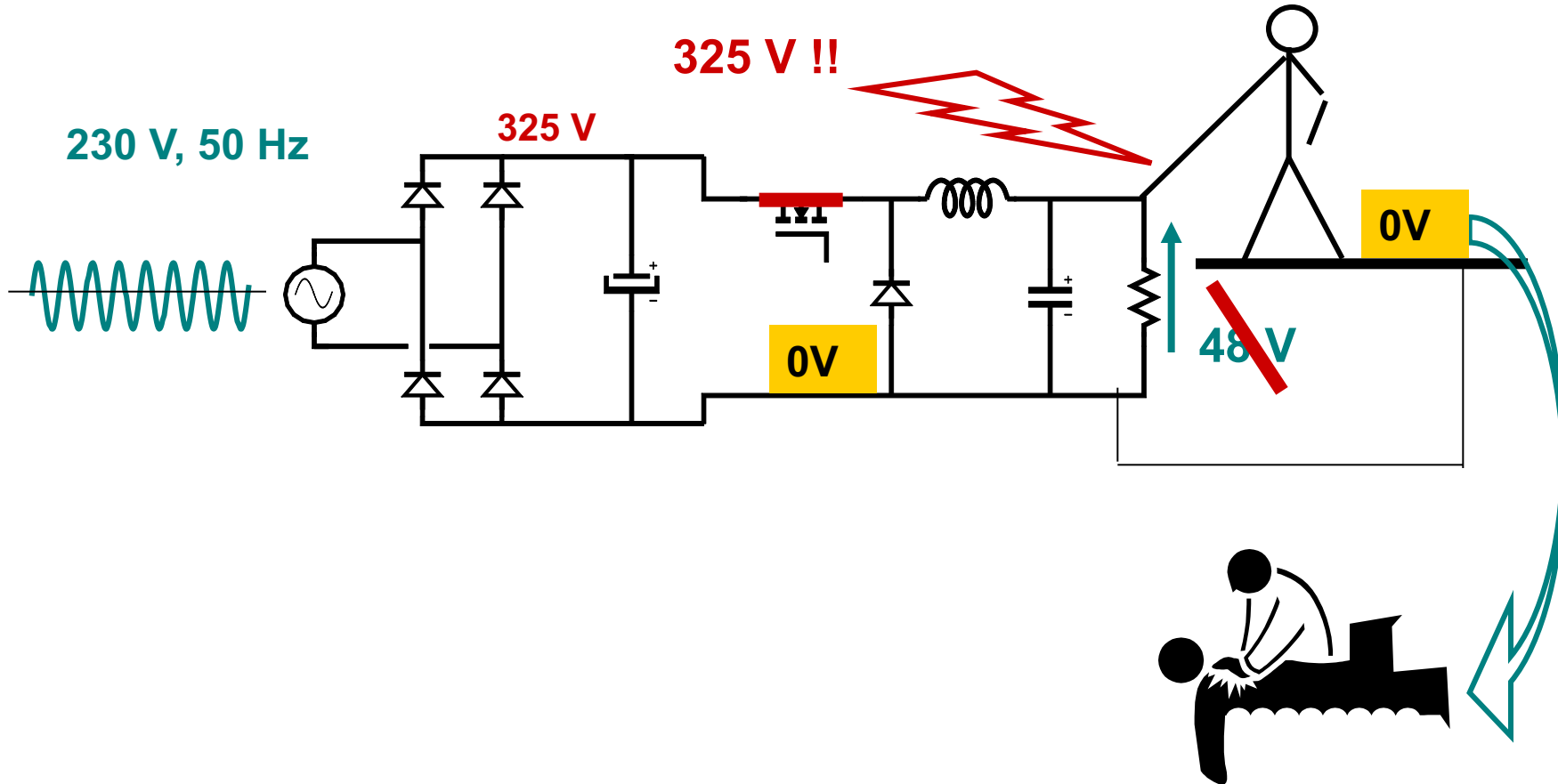
Solución: colocarlo en la parte de alta frecuencia (el convertidor CC/CC).

Necesidad de aislamiento galvánico



Seguridad

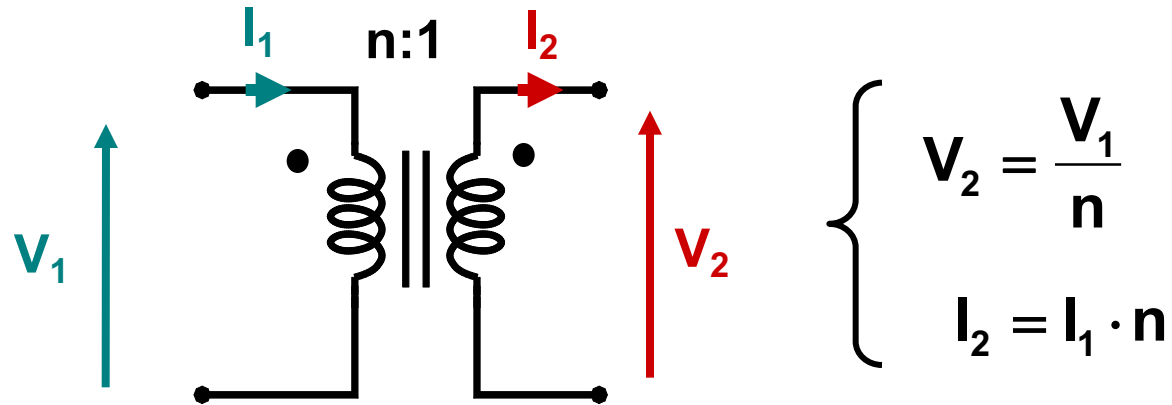
Ejemplo: si en el convertidor que se muestra en la figura se rompe el MOSFET quedando en cortocircuito, y una persona toca la borna de salida del convertidor, puede electrocutarse.



Si colocamos un transformador en el medio siempre habrá un elemento que se interponga entre la red y el usuario.

Convertidor Flyback

Concepto de transformador IDEAL

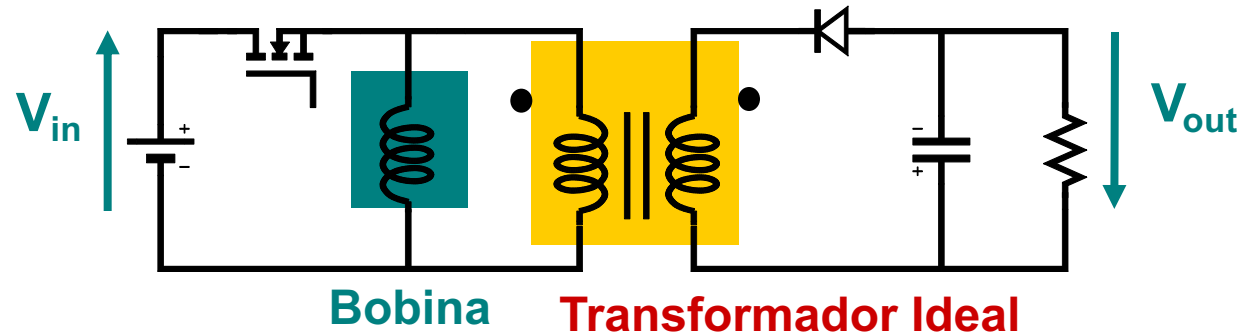
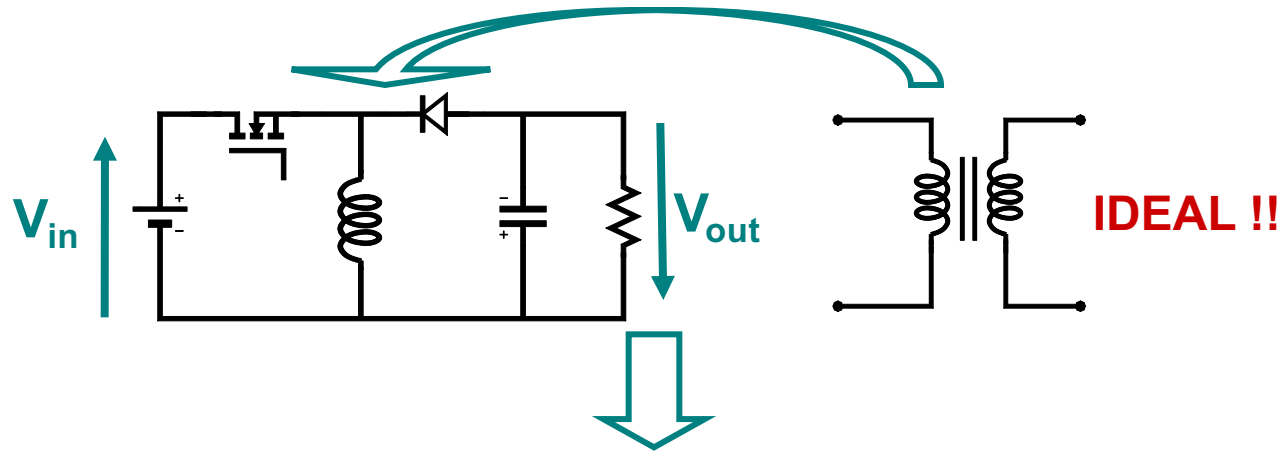


En un transformador ideal **no hay almacenamiento de energía**. Toda la energía que entra, sale. Se cumple:

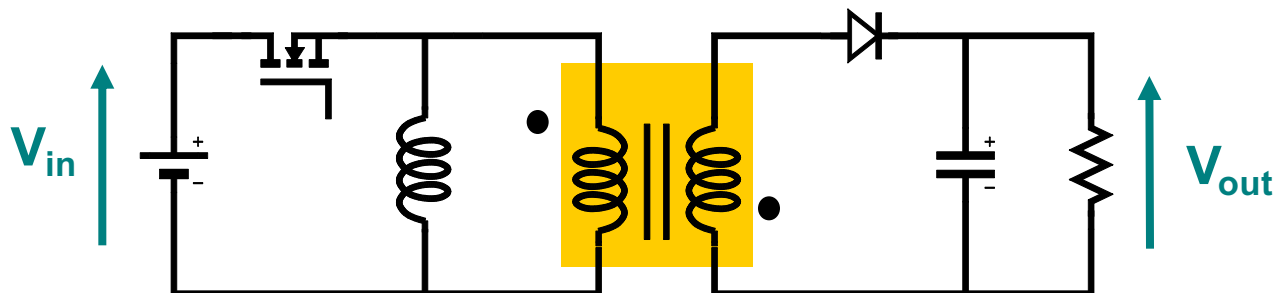
$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \quad \longrightarrow \quad P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$$

En general están pensados para que haya circulación de corriente simultáneamente por el primario y por el secundario.

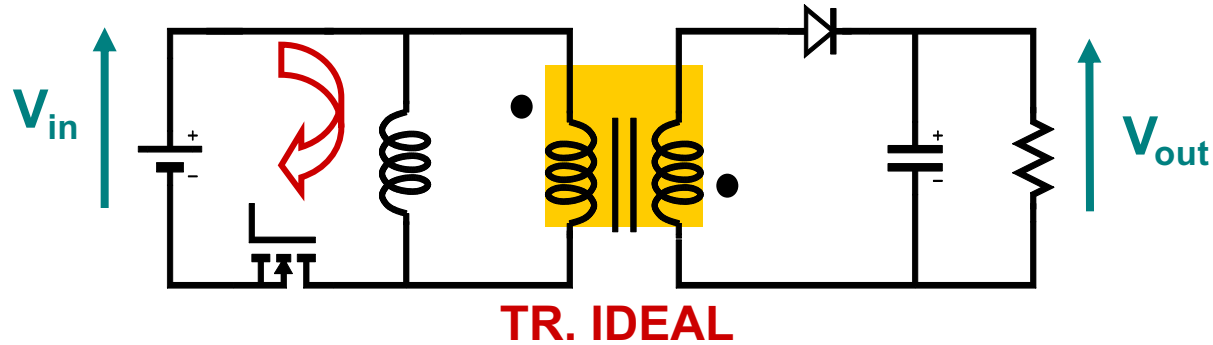
Podemos colocar un transformador **IDEAL** a uno de los convertidores sin aislamiento: el convertidor **Reductor-Elevador**.



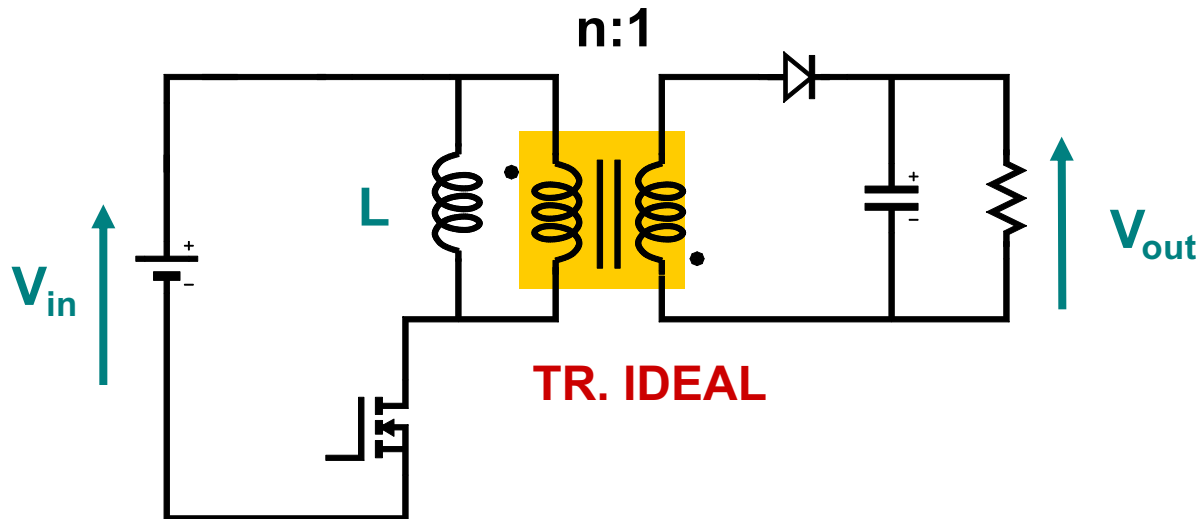
Cambiando los terminales correspondientes del transformador podemos obtener una tensión positiva:



El MOSFET podemos cambiarlo de sitio dentro de su propia malla para conseguir que esté referido a masa:



Convertidor FLYBACK

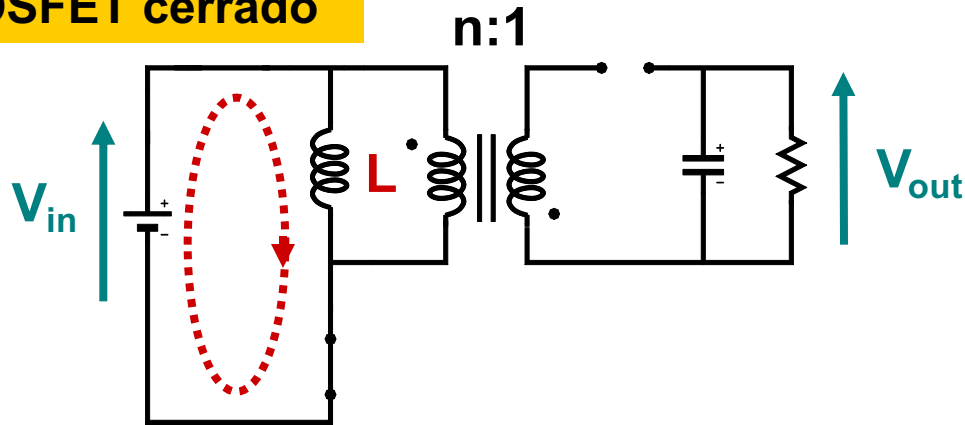


Funcionamiento del convertidor Flyback en MCC

Dos modos de funcionamiento: MCC y MCD dependiendo de cómo es la corriente por la bobina.

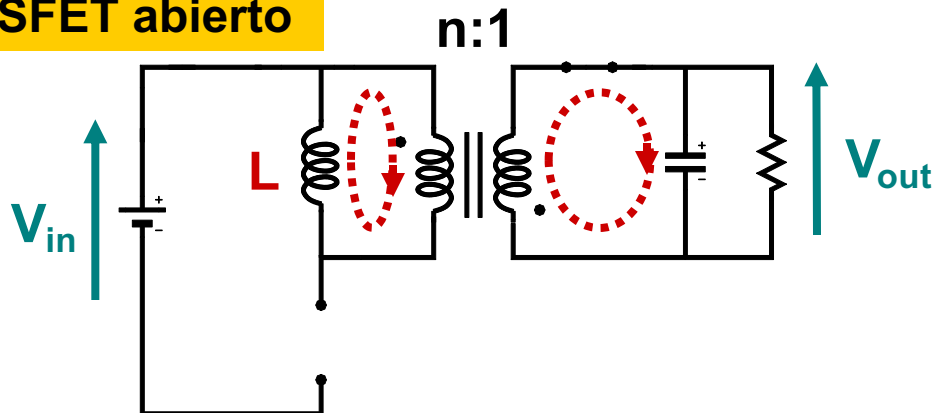
En MCC, el convertidor tiene 2 estados de funcionamiento:

MOSFET cerrado



Carga de la bobina desde la entrada

MOSFET abierto

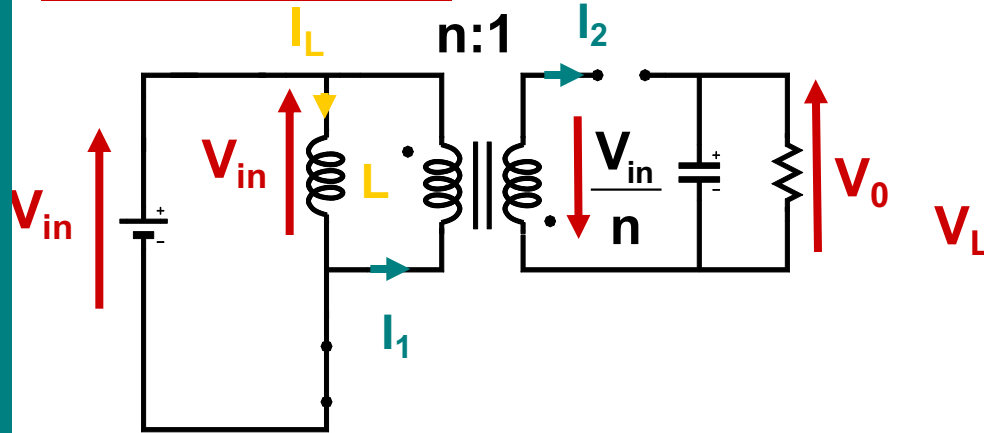


Descarga de la bobina a través del transformador **IDEAL** hacia la salida

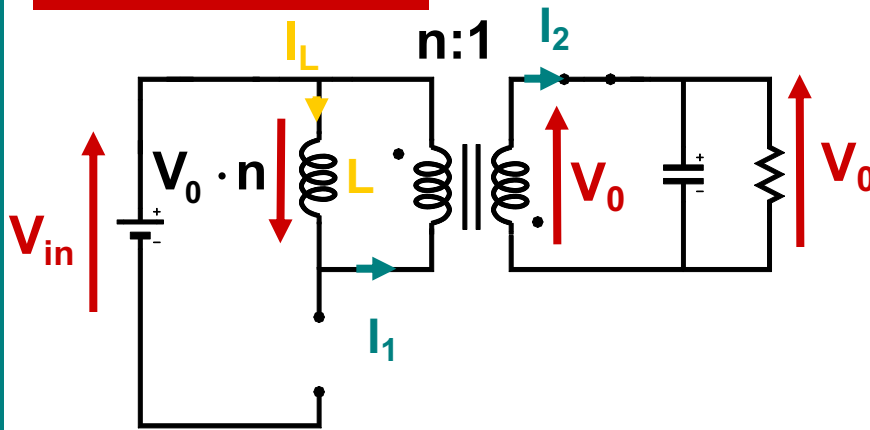
Funcionamiento del convertidor Flyback en MCC

La tensión media en la bobina debe ser nula

MOSFET cerrado



MOSFET abierto

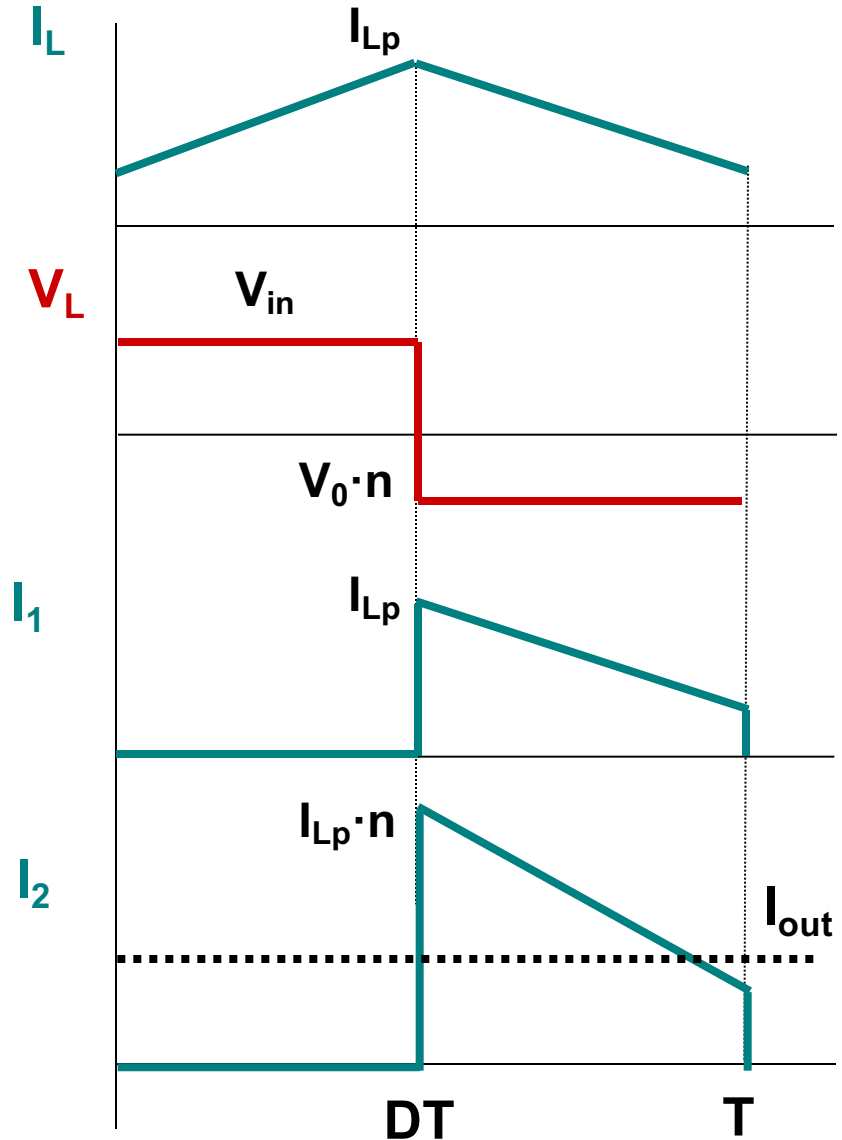


Por tanto:

$$V_{in} \cdot D = V_0 \cdot n \cdot (1-D)$$



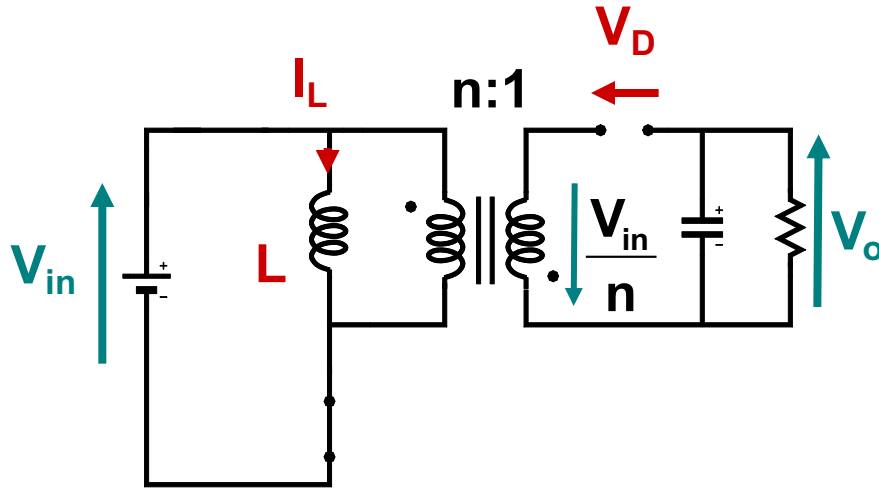
$$V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot \frac{D}{1-D}$$



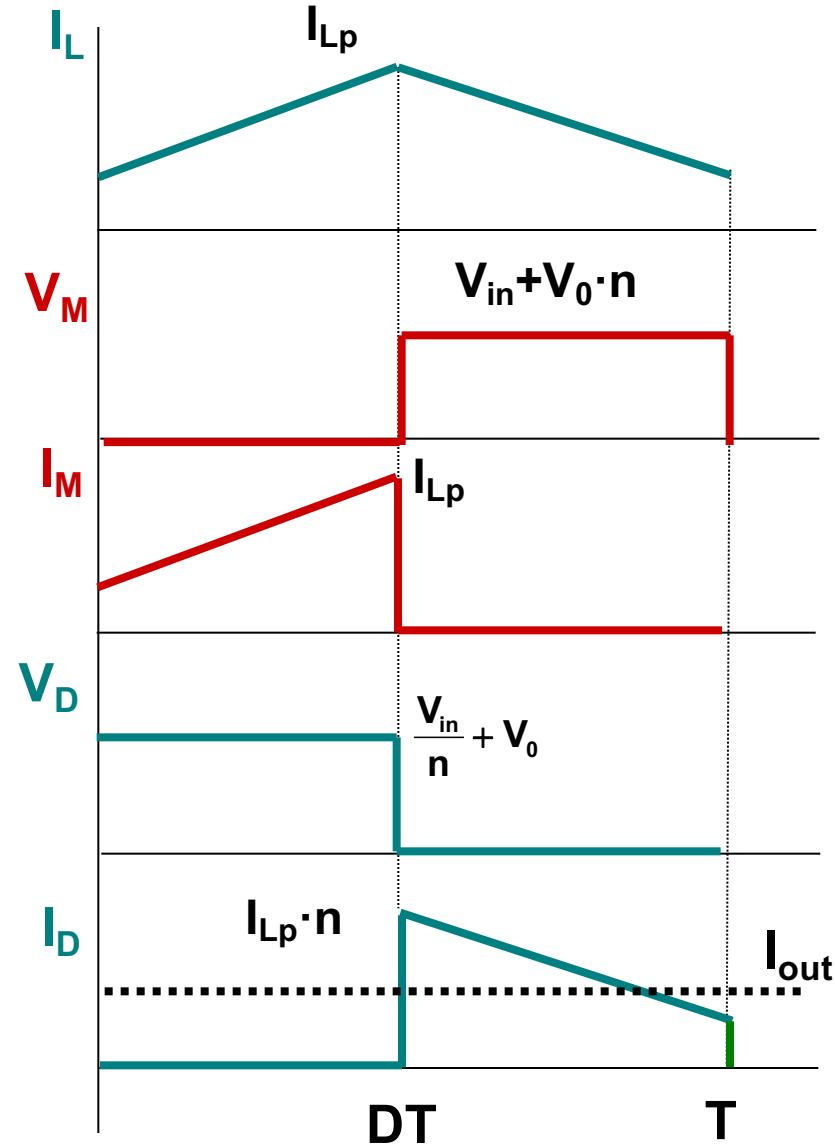
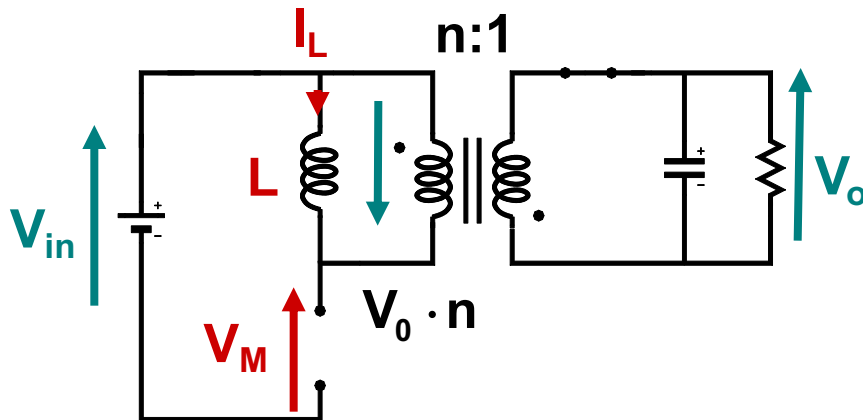
Funcionamiento del convertidor Flyback en MCC

Esfuerzos en los semiconductores

MOSFET cerrado



MOSFET abierto

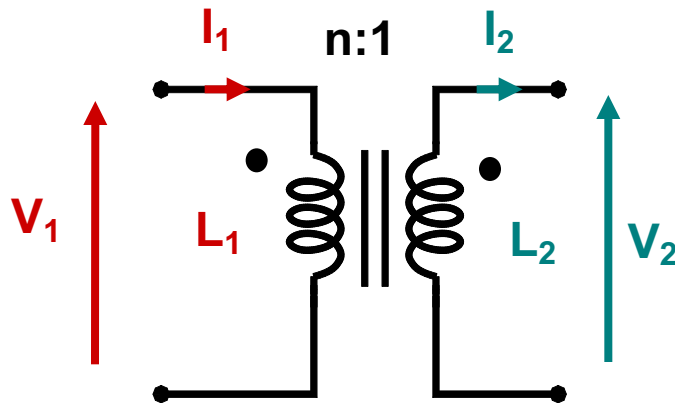


Funcionamiento del convertidor Flyback

Concepto de bobinas acopladas

En realidad, el convertidor Flyback **no** tiene una bobina con un transformador en paralelo. **El Flyback utiliza dos bobinas acopladas.**

Si en un núcleo magnético implementamos un devanado, creamos una bobina. Si sobre el mismo núcleo implementamos otro devanado más, creamos otra bobina acoplada a la primera.



L₁ tiene N₁ vueltas

L₂ tiene N₂ vueltas

Definimos n como: $n = \frac{N_1}{N_2}$

Se cumple: $L_2 = \frac{L_1}{n^2}$

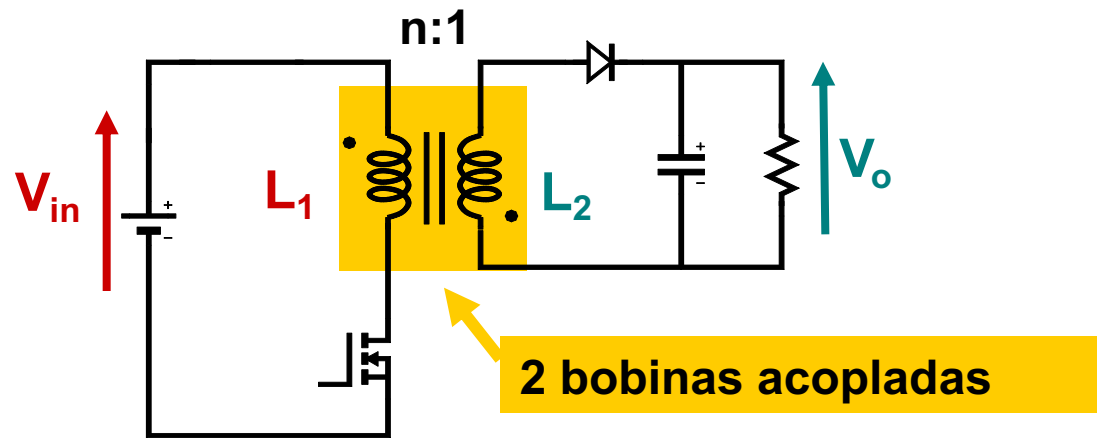
En cuanto a la tensión se comporta como un transformador: $V_2 = \frac{V_1}{n}$

Sin embargo, en general no hay circulación de corriente simultáneamente por primario y secundario. Suele ser alternativa. Además, SI hay almacenamiento de energía en el núcleo.

Funcionamiento del convertidor Flyback

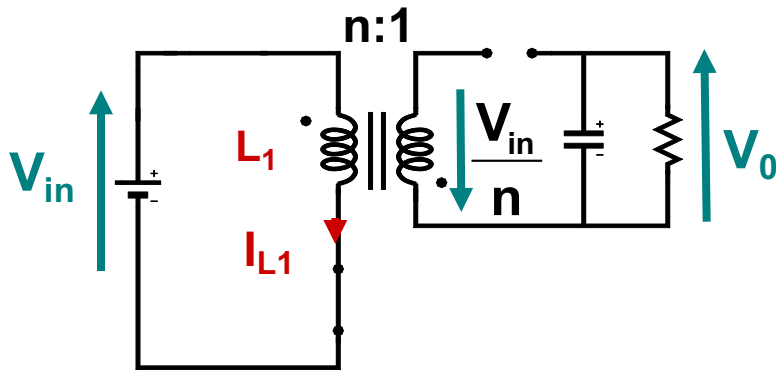
El Flyback tiene dos bobinas acopladas en el mismo núcleo magnético

En ningún momento hay circulación de corriente simultáneamente por ambos devanados



El ejemplo con transformador ideal en paralelo es didácticamente interesante pero técnicamente cuestionable.

Funcionamiento del convertidor Flyback



Interruptor cerrado

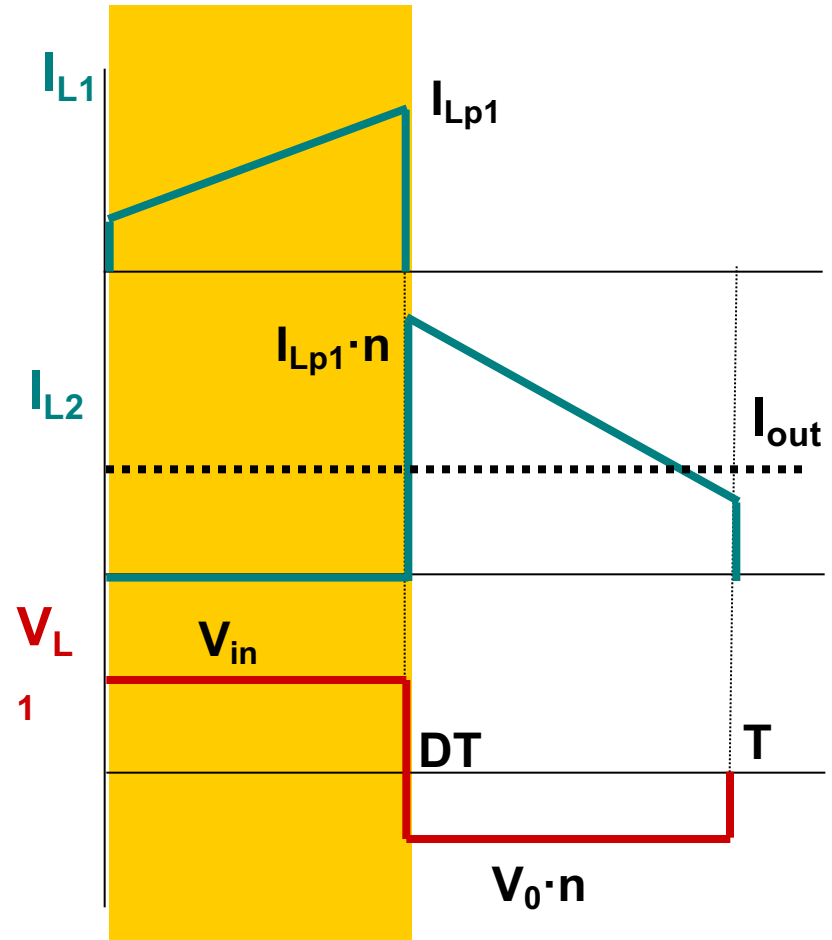
Se carga la bobina L_1

Diodo cortado

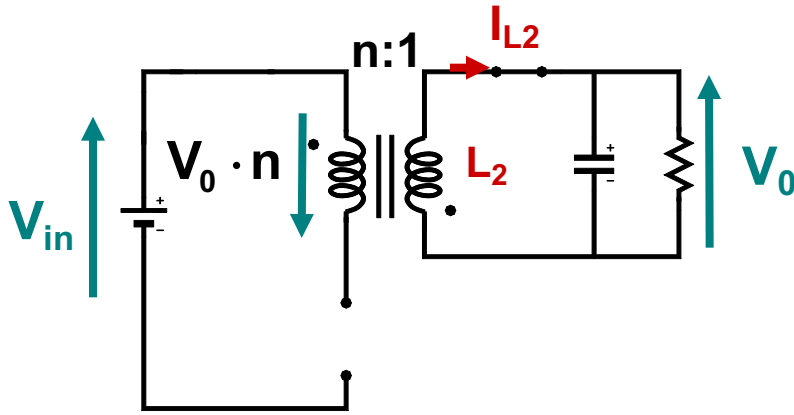


No hay circulación de corriente por el secundario.

Se está almacenando energía en el núcleo



Funcionamiento del convertidor Flyback



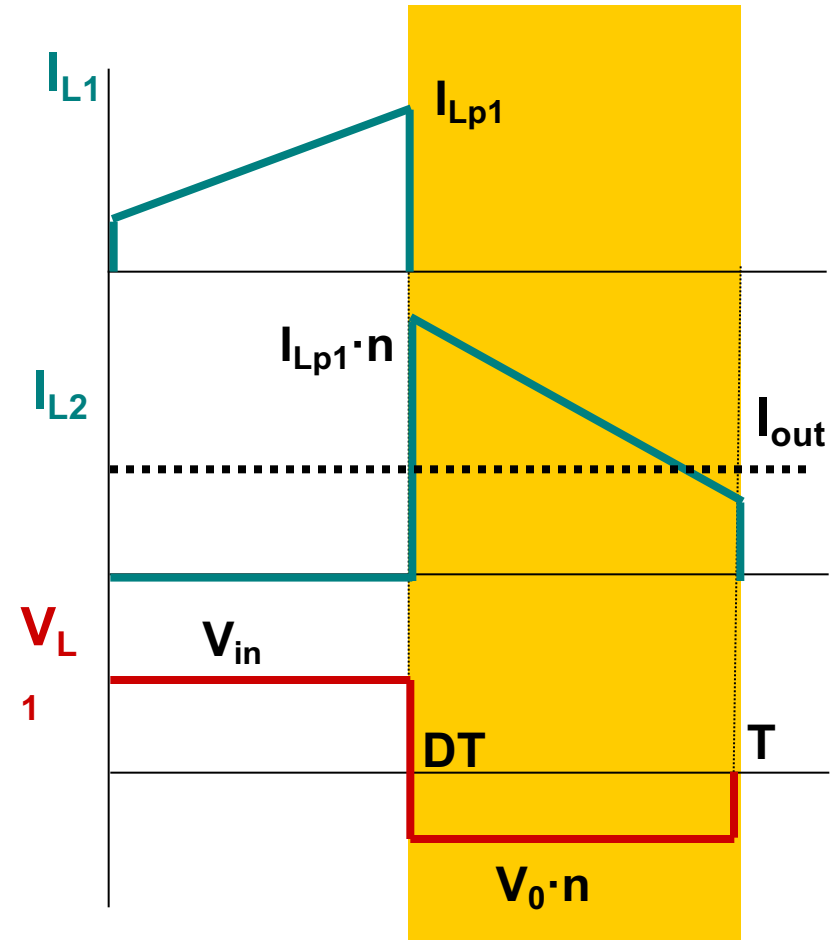
Interruptor abierto

El flujo debe mantenerse en el núcleo. No puede haber un corte brusco de la corriente.



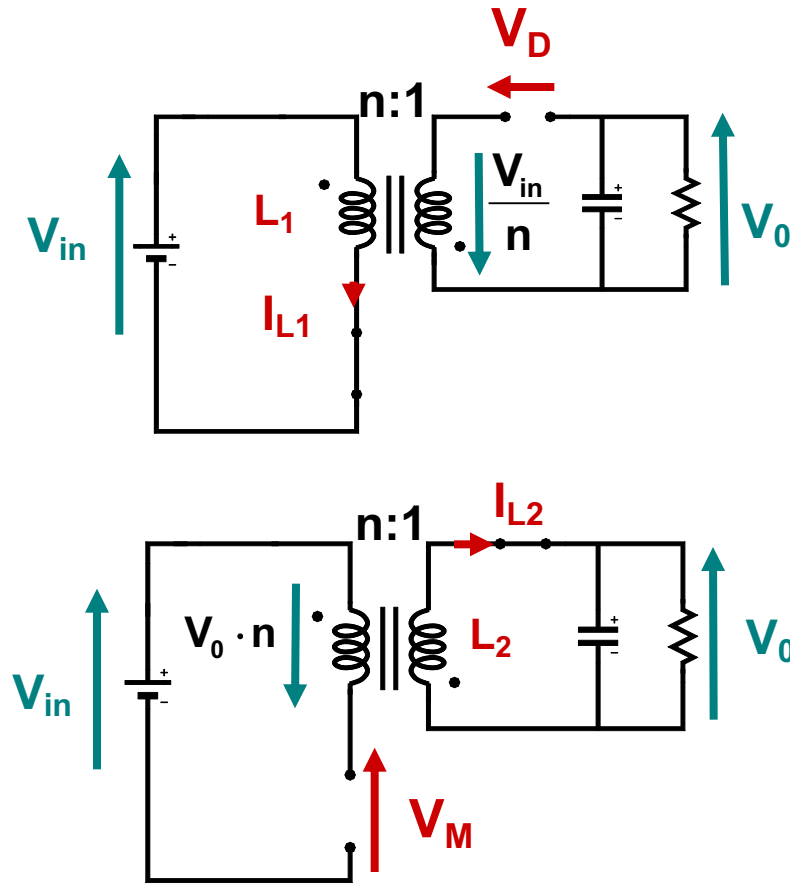
La corriente puede salir por el otro devanado de la bobina aunque afectada por la relación de transformación “n”.

La tensión media en la bobina debe ser nula. Se cumple la misma relación que antes.



Funcionamiento del convertidor Flyback

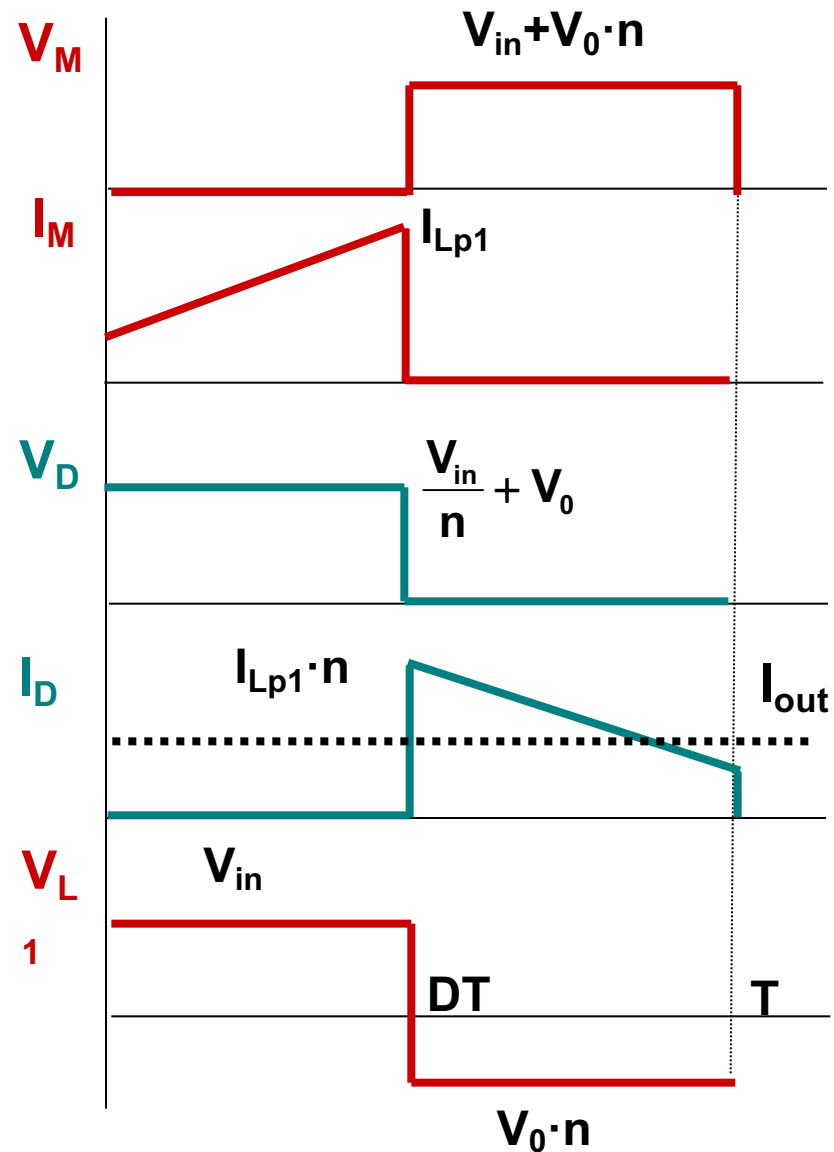
Los esfuerzos en los semiconductores serán evidentemente los mismos que los explicados anteriormente.



Se cumple: $V_{in} \cdot D = V_0 \cdot n \cdot (1-D)$



$$V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot \frac{D}{1-D}$$



Límite entre MCC y MCD

La corriente está en el límite entre MCC y MCD

Dado un valor de I_{out} , ¿Qué valor de L consigue obtener esta corriente?

La corriente de pico es:

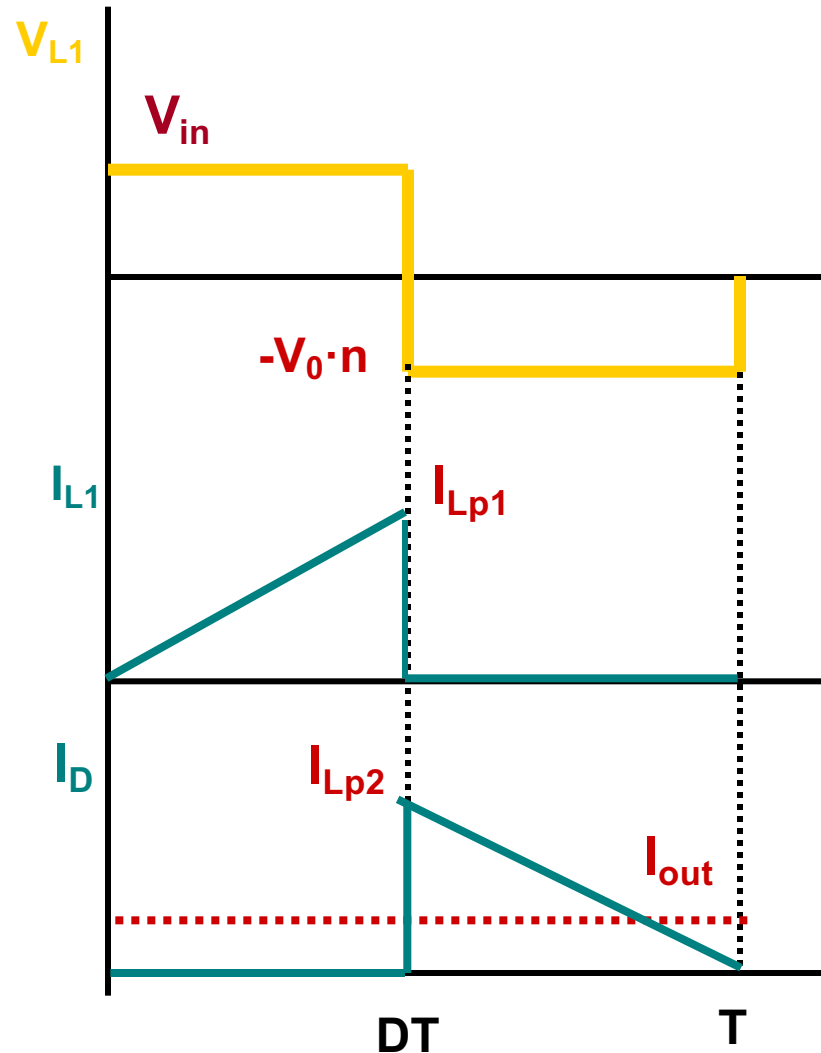
$$I_{Lp1} = \frac{1}{L_1} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

El valor medio de la corriente I_D es la corriente de salida:

$$I_0 = \bar{I}_D = \frac{1}{2} I_{Lp2} \cdot (1-D) = \frac{1}{2L_1} \cdot V_{in} \cdot n \cdot D \cdot (1-D) \cdot T$$

Se cumple: $V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot \frac{D}{1-D}$

Por tanto: $L_{1_LIM} = \frac{V_0 \cdot T \cdot n^2}{2 \cdot I_0} \cdot (1-D)^2$



Cálculo de la relación de transformación

En general, cuando un convertidor se descarga pasa a operar en MCD

En MCD se cumple:

Tensión media en L nula:

$$V_{in} \cdot D = V_0 \cdot n \cdot \Delta_2$$

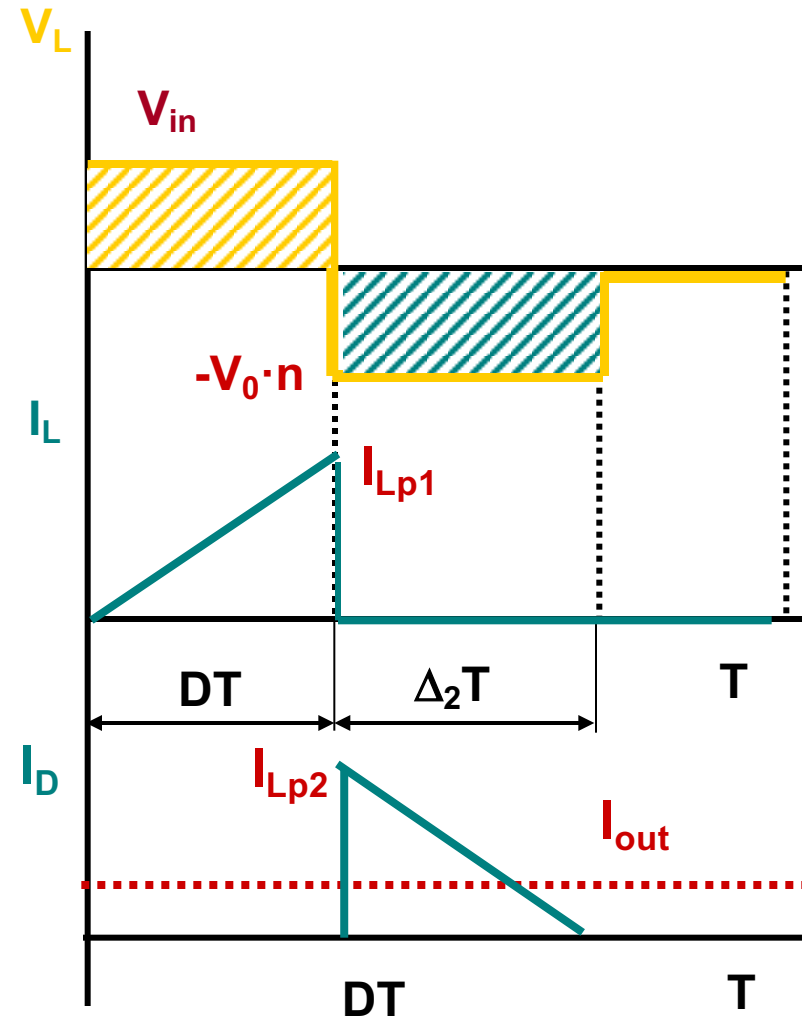
La corriente de pico es:

$$I_{Lp1} = \frac{1}{L_1} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{Lp2} \cdot \Delta_2 = \frac{1}{2} I_{Lp1} \cdot n \cdot \Delta_2 \quad I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$$

$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L_1}{R_L T}}$$



R_L es la carga de salida

Operación en MCD

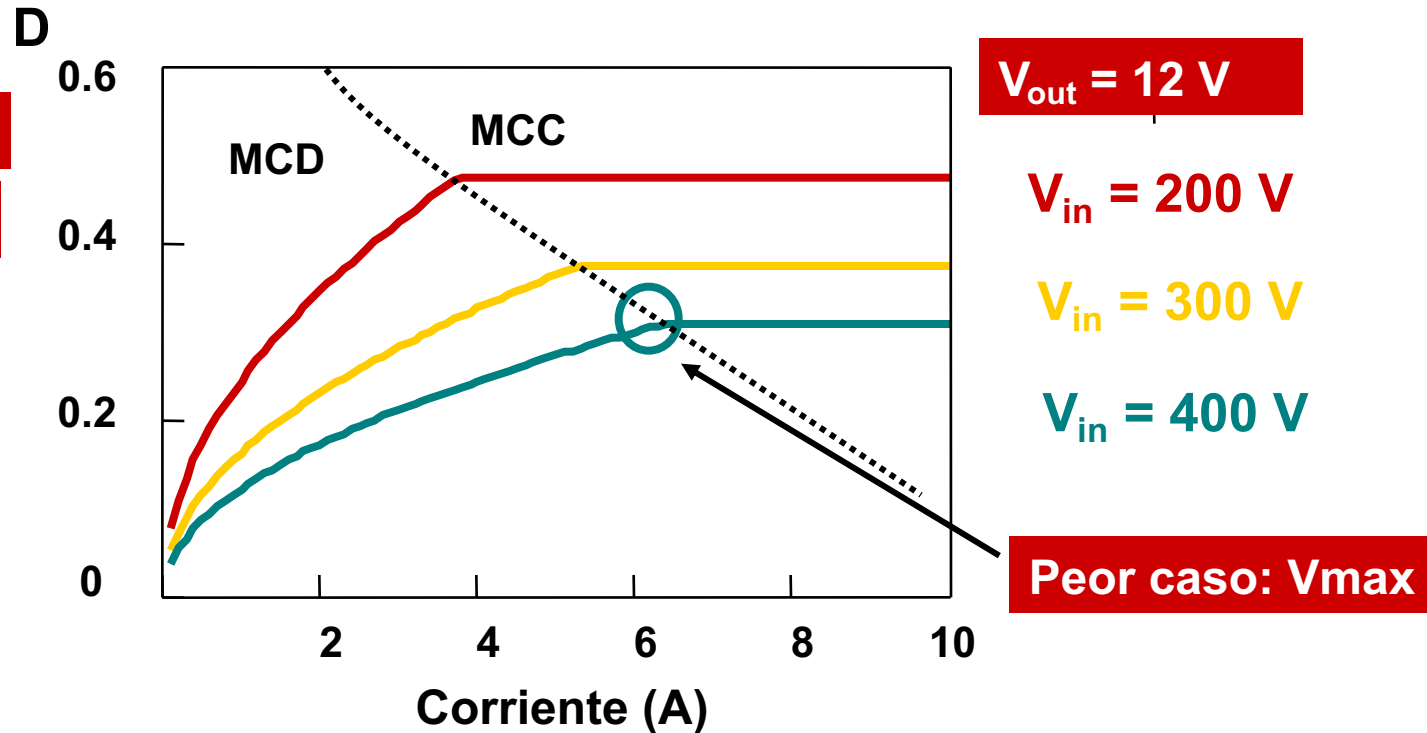
El ciclo de trabajo necesario para obtener una cierta tensión de salida depende de la carga R_L y del valor de L

El peor caso se da en condiciones de tensión de entrada máxima

$$L = 1 \text{ mH}$$

$$f = 100 \text{ kHz}$$

$$n = 15$$



El ciclo de trabajo depende de la carga cuando el convertidor opera en MCD

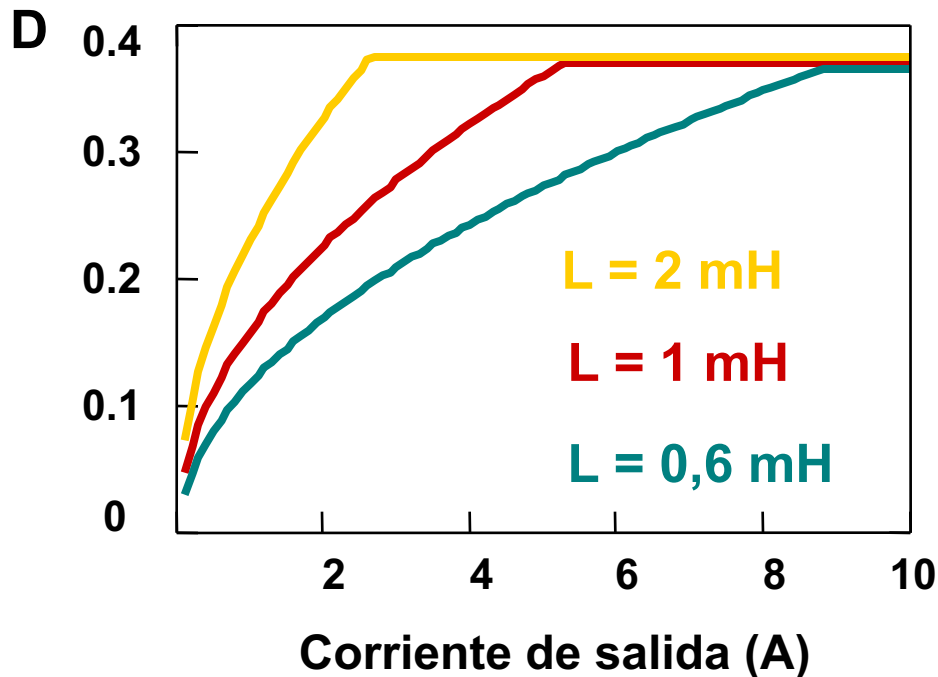
$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L_1}{R_L T}}$$

R_L : Carga del convertidor

Operación en MCD

En MCD, D también depende del valor de L

- Si L es grande, el convertidor trabajará en MCC hasta cargas bajas
- Si L es pequeña, el convertidor trabajará casi todo el tiempo en MCD



$$V_{in} = 300 \text{ V}$$

$$V_0 = 12 \text{ V}$$

$$n = 15$$

$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L_1}{R_L T}}$$

Cálculo del condensador

El rizado pico-pico en el condensador será:

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{\Delta Q}{C}$$

En régimen permanente:

Carga = Descarga

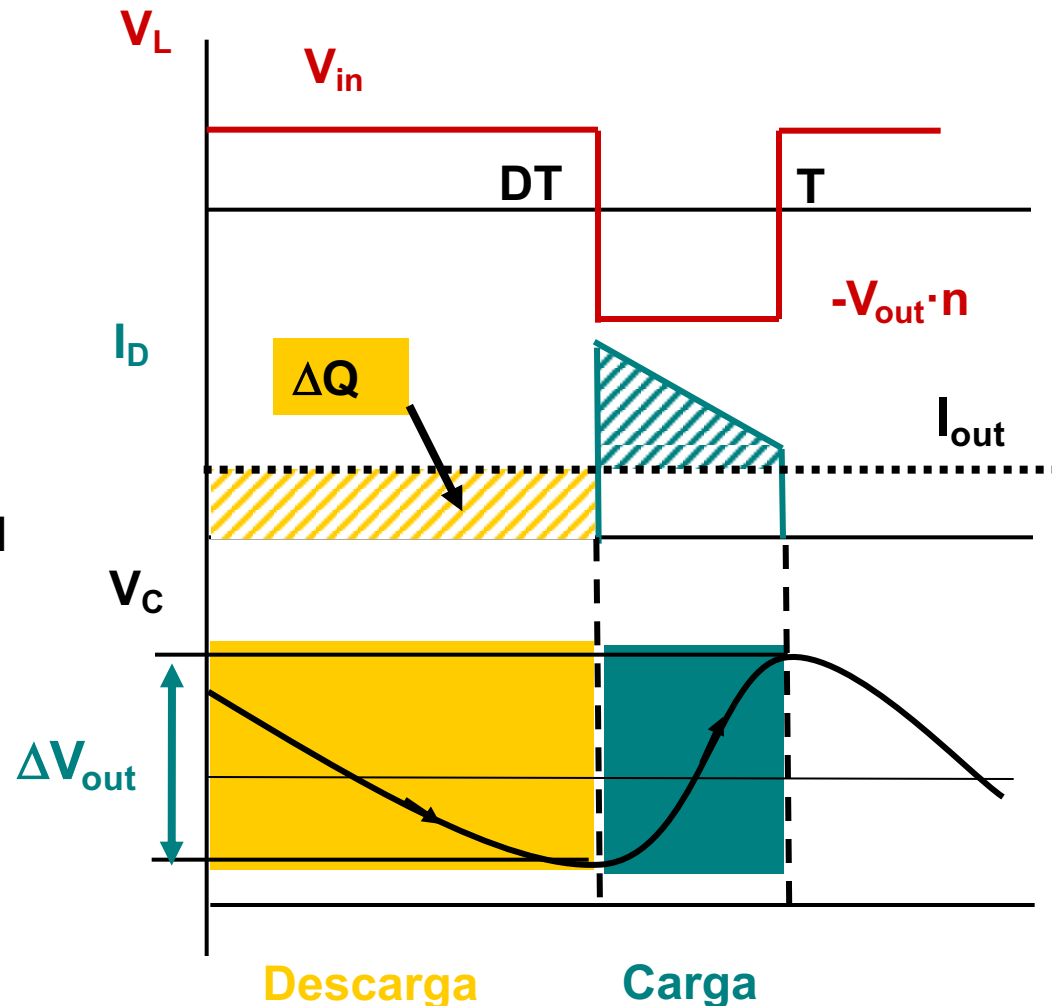
En este caso resulta más fácil basarse en la descarga (área amarilla):

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot I_{\text{out}} \cdot D \cdot T$$



$$C = \frac{1}{\Delta V_{\text{out}}} \cdot I_{\text{out}} \cdot D \cdot T$$

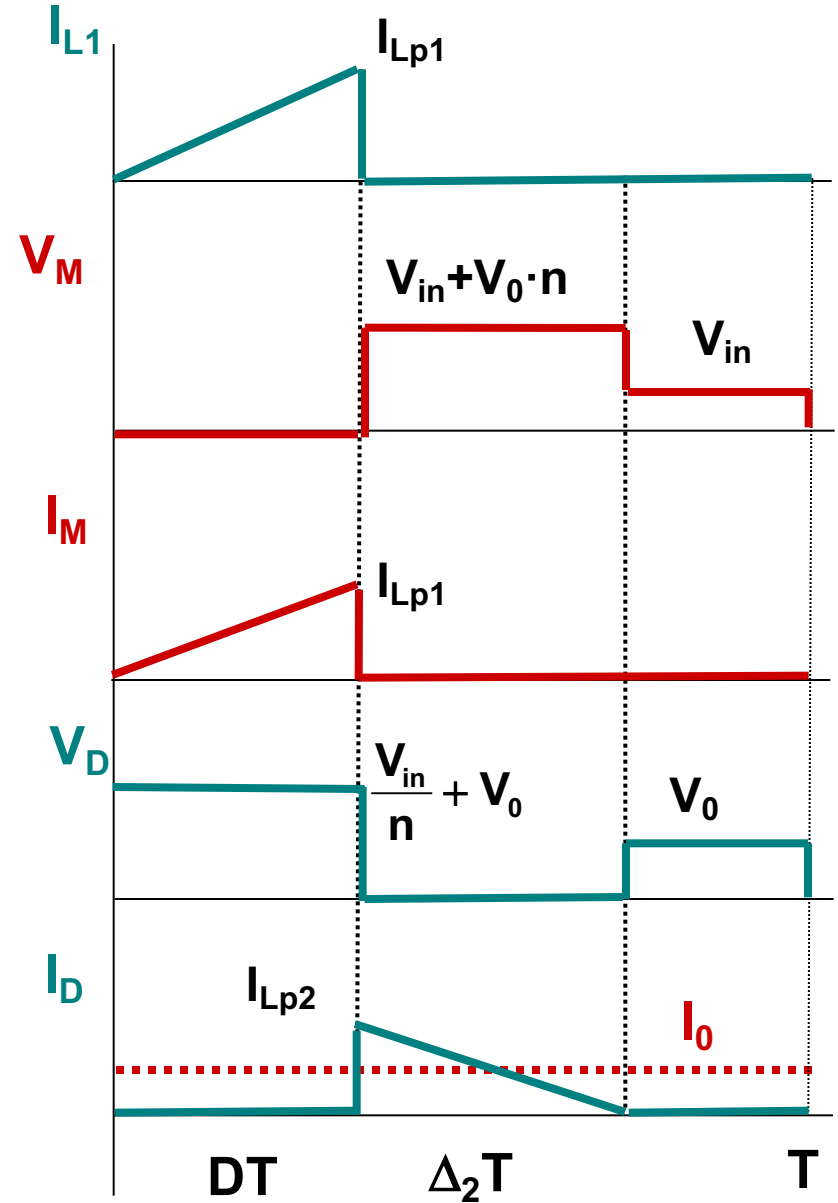
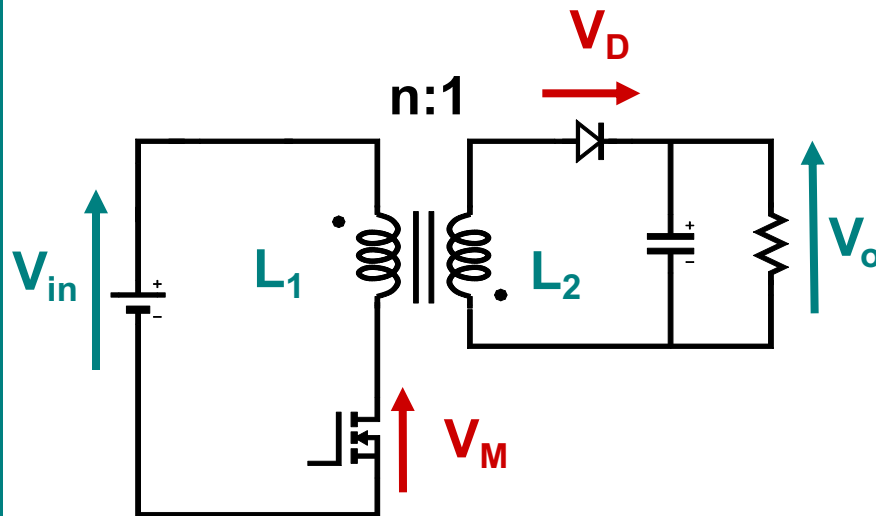
Formas de onda



Conocido el valor de L y tomando como dato ΔV_{out} podemos calcular C

Esfuerzos en los semiconductores

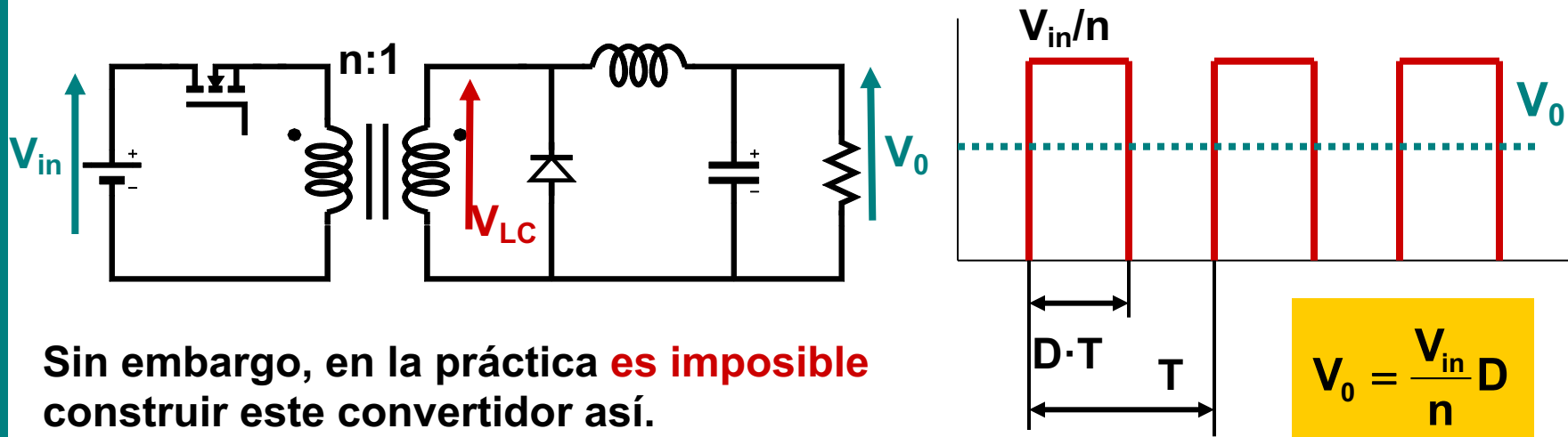
Convertidor Flyback en MCD



El convertidor Forward

Este convertidor se deriva del convertidor reductor.

Si el transformador fuese **ideal**, podríamos hacer lo siguiente:



Sin embargo, en la práctica **es imposible** construir este convertidor así.

El transformador tiene una inductancia magnetizante

La tensión media en la bobina debe ser nula

Cuando el diodo de libre circulación conduce la tensión en el transformador es nula

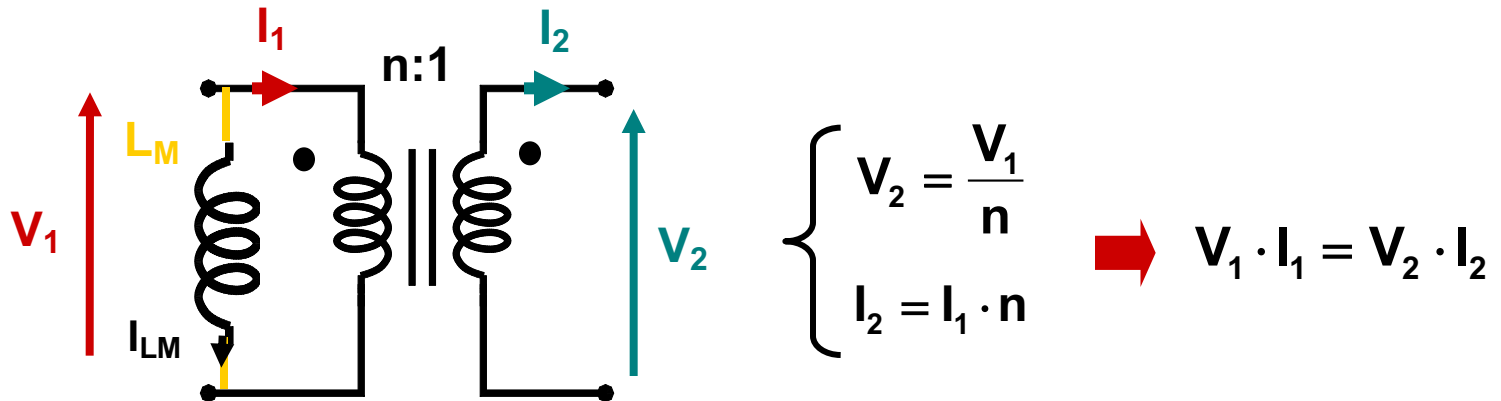
Si la tensión media no es cero, el transformador se satura

Concepto de transformador real

En un transformador **ideal** no hay almacenamiento de energía.

En un transformador **REAL** se almacena algo de energía en la inductancia magnetizante L_M

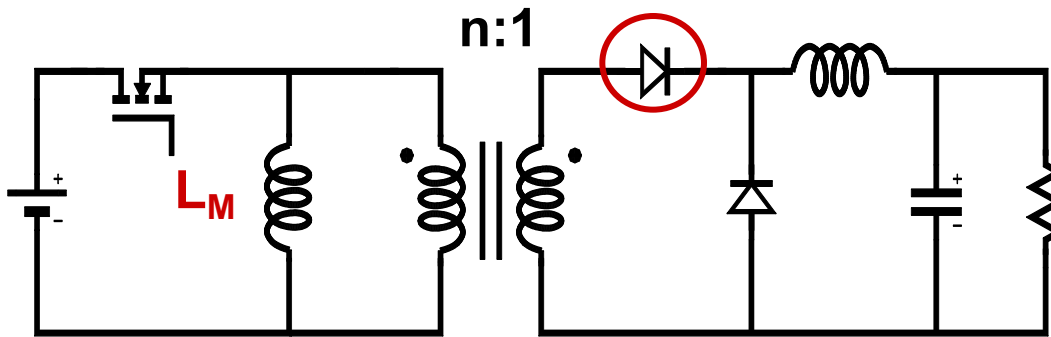
El circuito equivalente es una bobina L_M con un transformador IDEAL en paralelo.



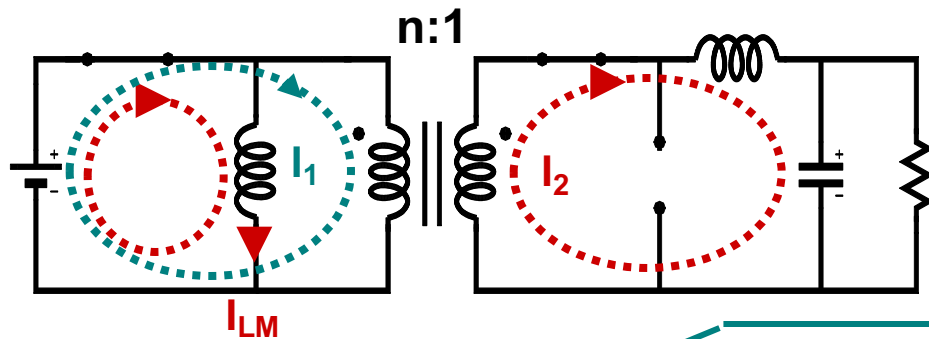
Si L_M es grande, la corriente I_{LM} será pequeña y no tendrá casi influencia en el funcionamiento.

La potencia saliente será muy similar a la potencia entrante. **En general están pensados para que haya circulación de corriente simultáneamente por el primario y por el secundario: la única energía almacenada es la de la bobina magnetizante.**

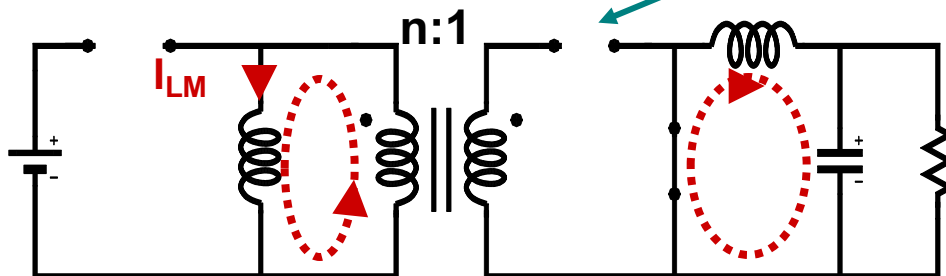
Añadiendo un diodo en el secundario conseguimos que el transformador no esté en paralelo con el diodo de libre circulación. Así, la tensión en el transformador es libre y no queda fijada a cero.



Sin embargo, con este circuito todavía no conseguimos desmagnetizar el transformador:



La bobina se carga y además, enviamos energía al secundario a través del transformador

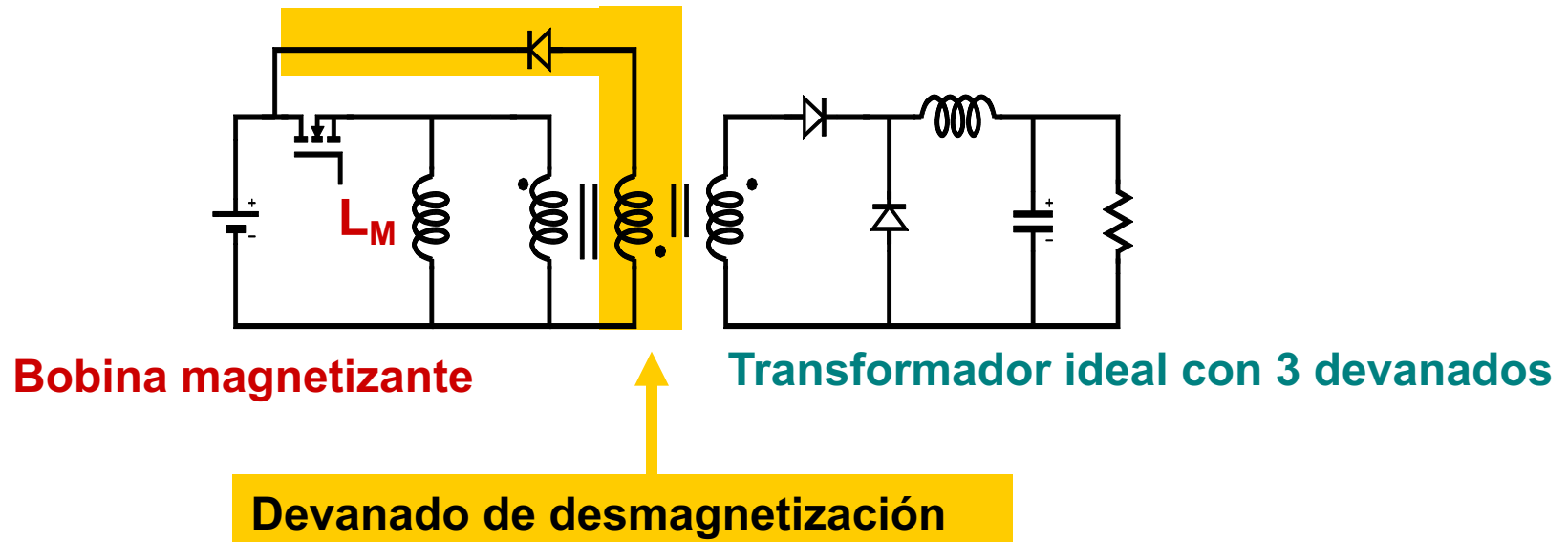


La corriente magnetizante circula por el primario del transformador pero el diodo impide que circule corriente por el secundario:
IMPOSIBLE

Debemos implementar algún sistema que ponga tensión negativa en la bobina magnetizante

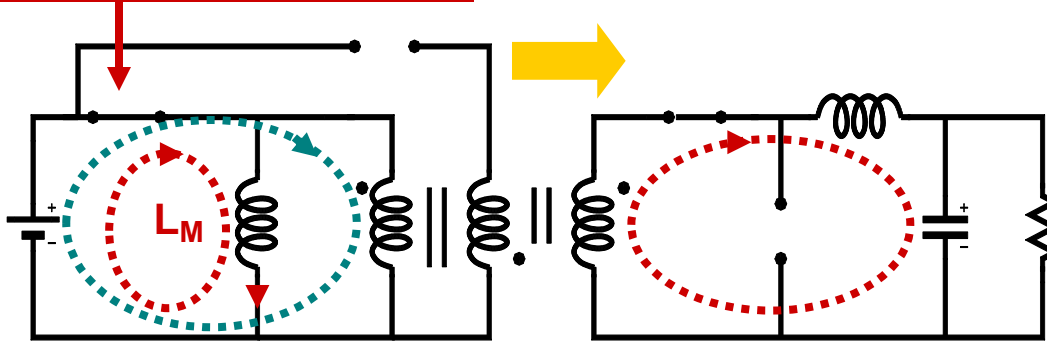
Además, debe permitir que las corrientes del transformador circulen adecuadamente

La solución tradicional se basa en implementar un devanado adicional EXCLUSIVAMENTE para desmagnetizar:



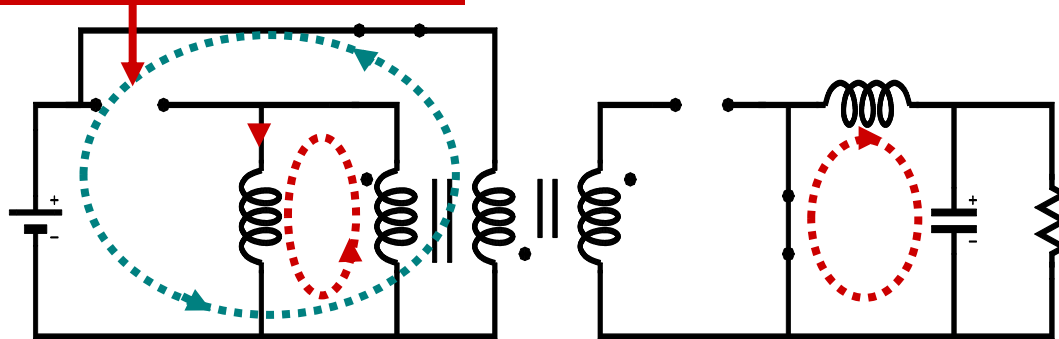
Idea básica de funcionamiento

Interrupción cerrada

Se carga L_M

Transferencia de energía al secundario

Interrupción abierto



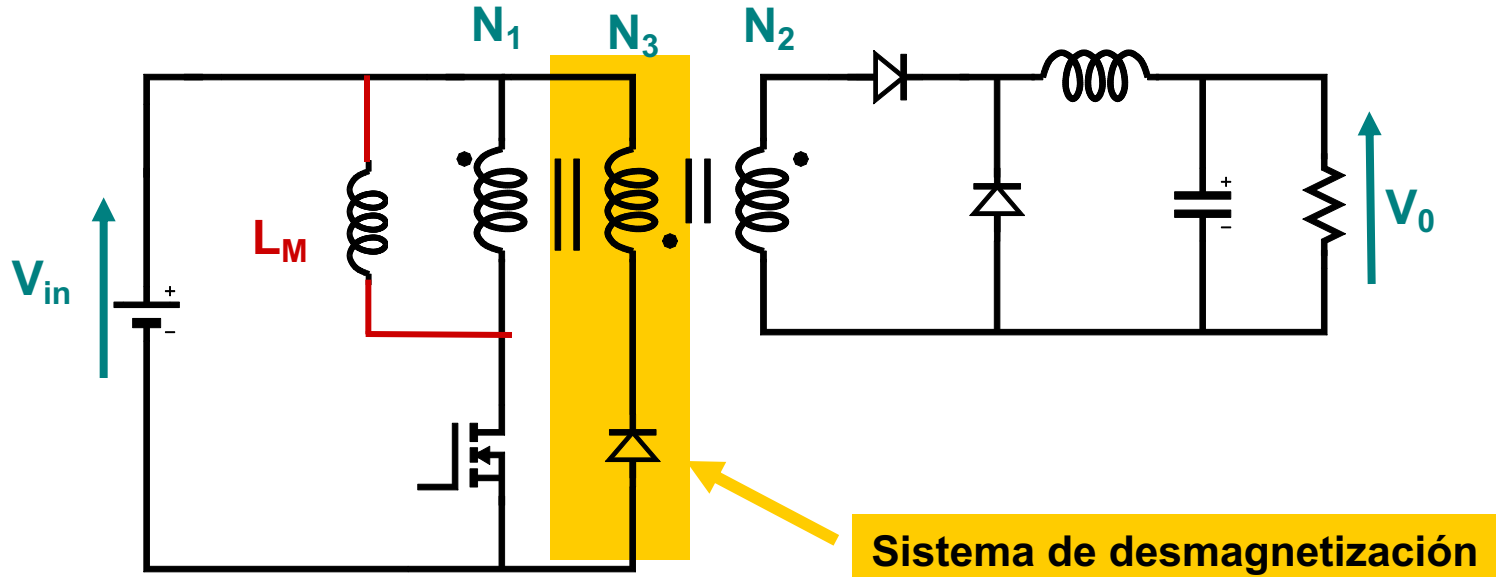
La corriente magnetizante se cierra por el devanado de desmagnetización

La corriente de salida se cierra por el diodo de libre circulación

No hay transferencia de energía al secundario

Ponemos una tensión negativa sobre la inductancia magnetizante: la tensión media puede ser nula

Finalmente, colocamos el interruptor principal referido a masa para facilitar su manejo.



Transformador con tres devanados:

N_1 : número de vueltas del devanado del primario

N_2 : número de vueltas del devanado del secundario

N_3 : número de vueltas del devanado de desmagnetización

Relación de transformación principal:

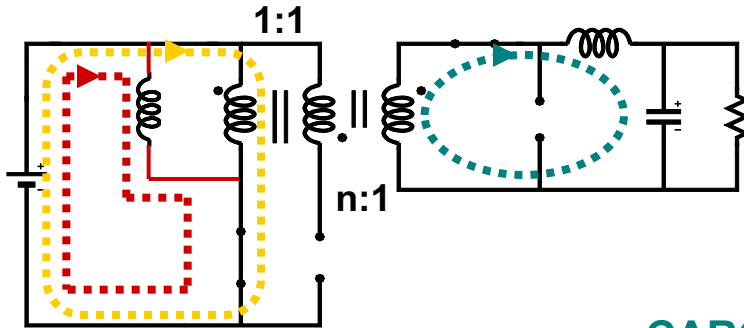
$$n = \frac{N_1}{N_2}$$

Relación de transformación auxiliar:

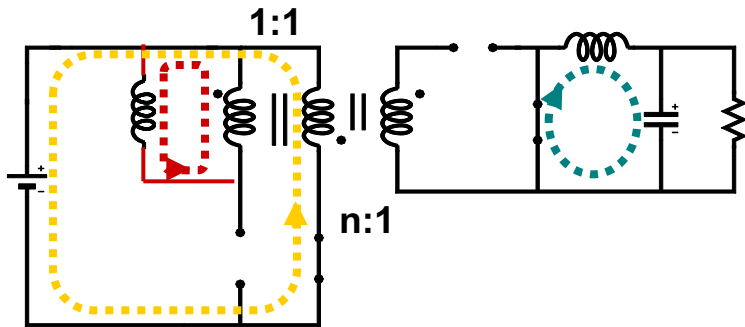
$$n_{\text{aux}} = \frac{N_1}{N_3}$$

Funcionamiento del convertidor Forward en MCC

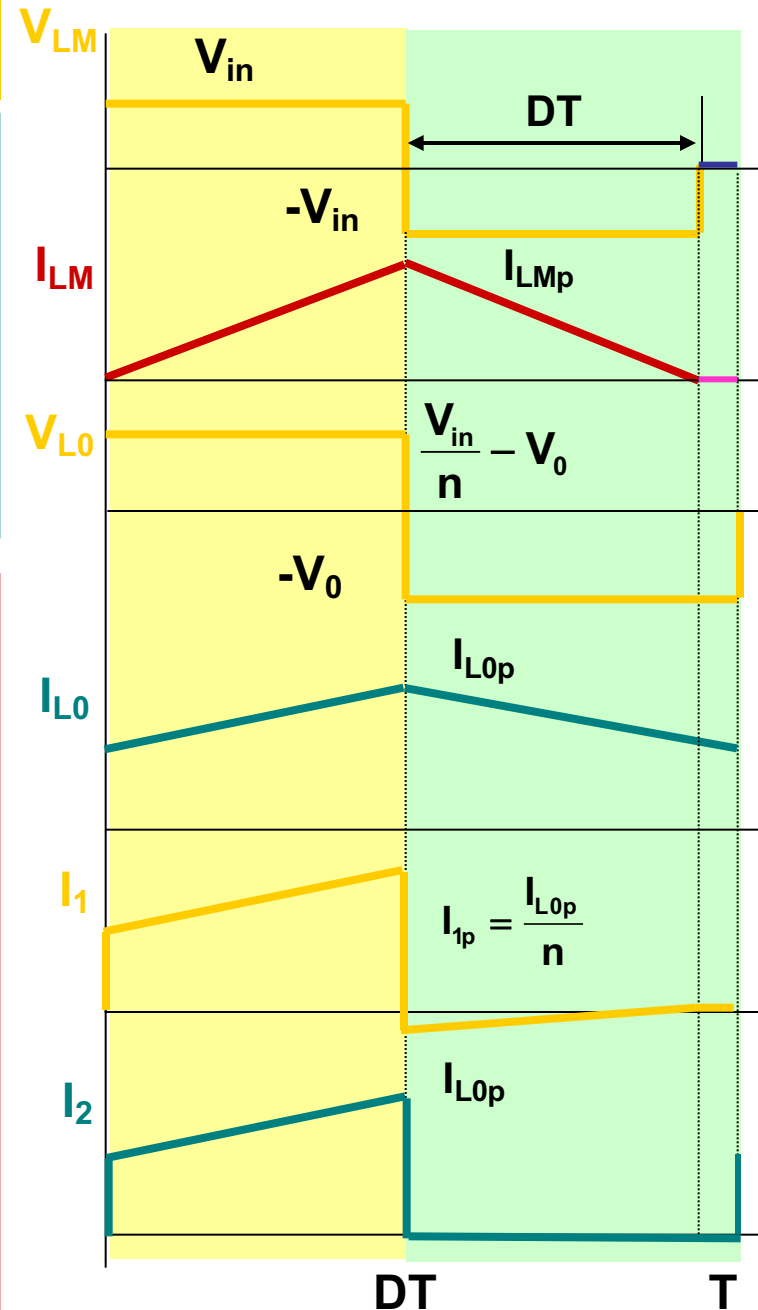
De nuevo tenemos dos estados de funcionamiento (en la bobina de salida):



CARGA

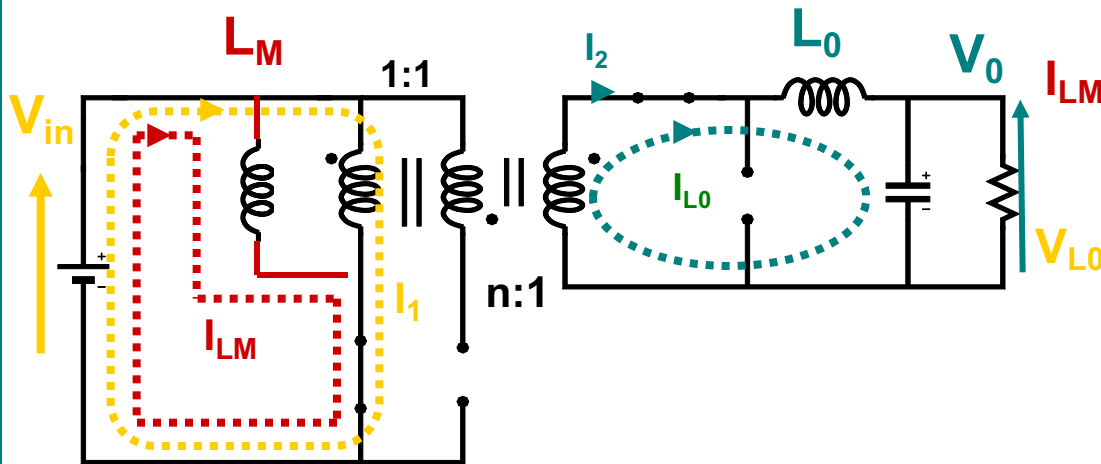


DESCARGA



Funcionamiento del convertidor Forward en MCC

Carga de la bobina de salida L_0 y de L_M

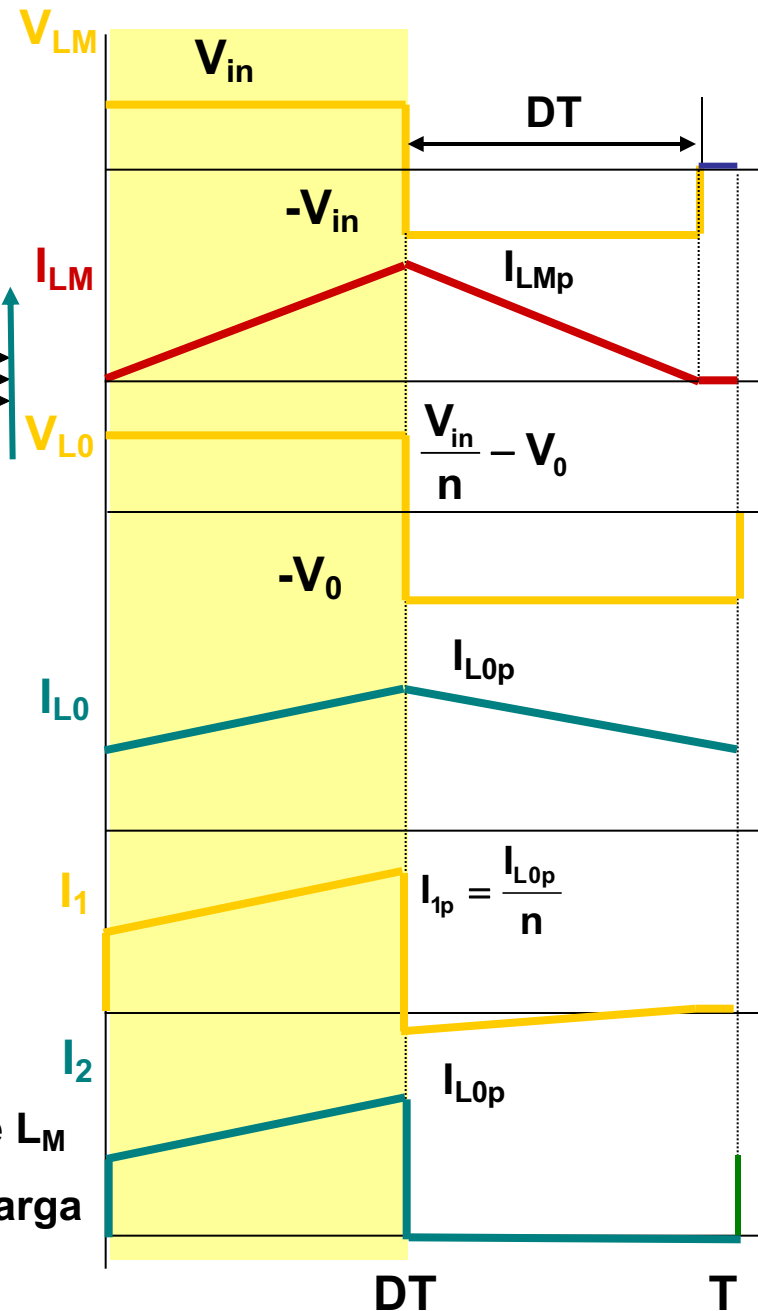


En este estado ocurren dos cosas:

- Se carga la bobina magnetizante
- Enviamos energía al secundario a través del transformador

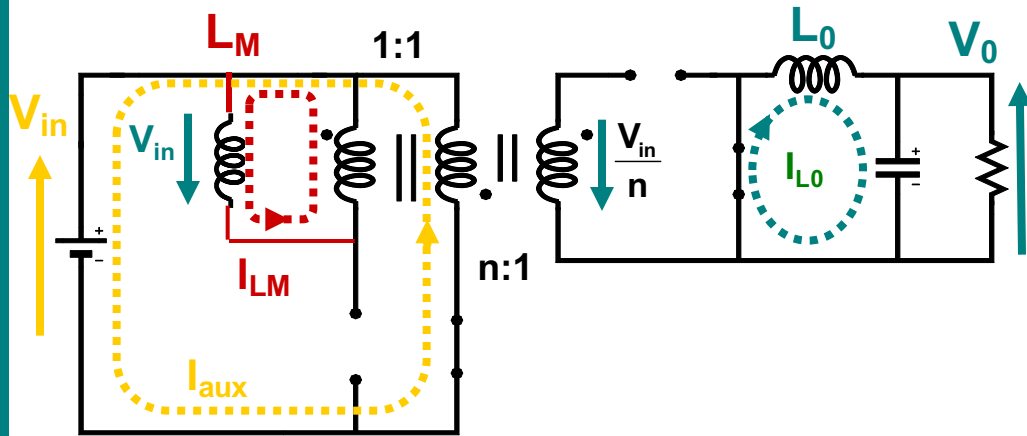
Son procesos independientes:

- La corriente magnetizante depende del valor de L_M
- La corriente I_1 depende de la bobina L_0 y de la carga del convertidor



Funcionamiento del convertidor Forward en MCC

Descarga de L_0 y de L_M

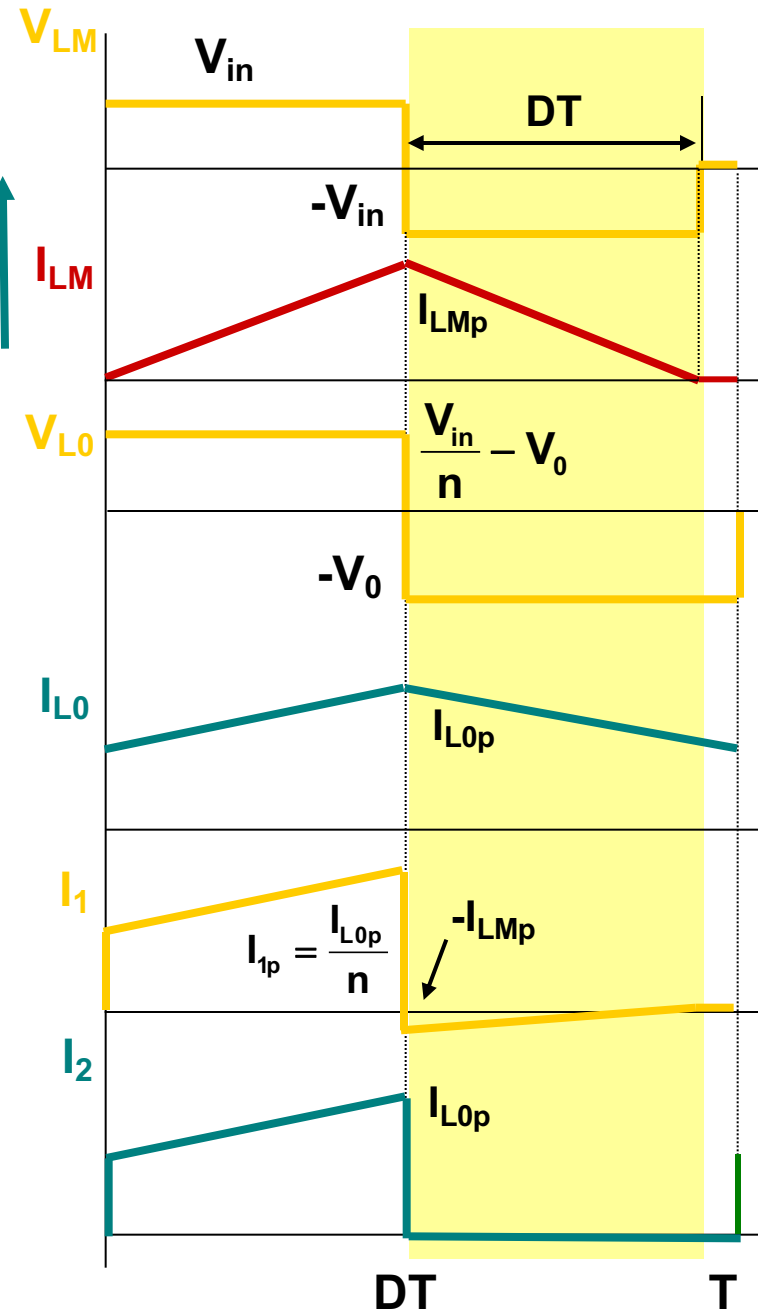


En este intervalo ocurren dos cosas:

Se desmagnetiza L_M hasta que su corriente llega a cero. En este caso ($n_{aux}=1:1$), la tensión negativa es igual a la positiva. Por tanto, tarda el mismo tiempo en magnetizarse que en desmagnetizarse (DT). Genéricamente:

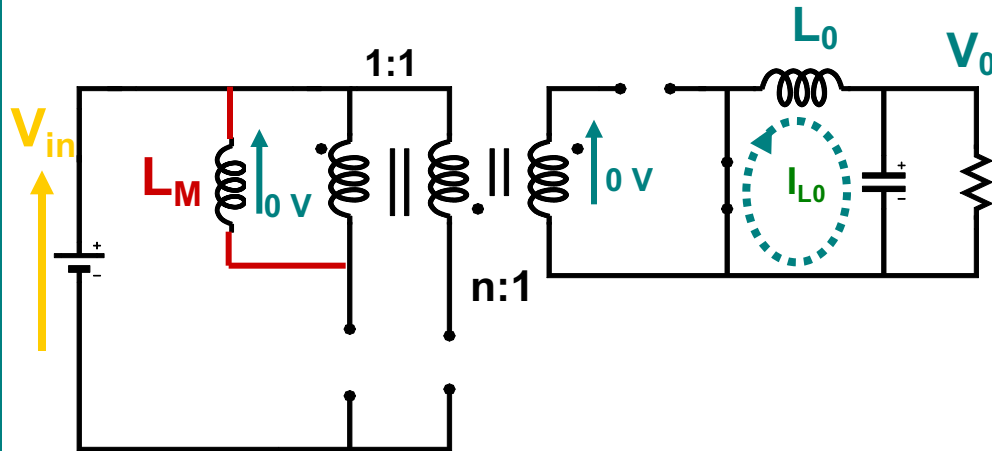
$$V_{in} \cdot D = V_{in} \cdot n_{aux} \cdot D_2$$

Además, la corriente I_{L0} circula por el diodo de libre circulación y comienza a desmagnetizarse la bobina de salida.



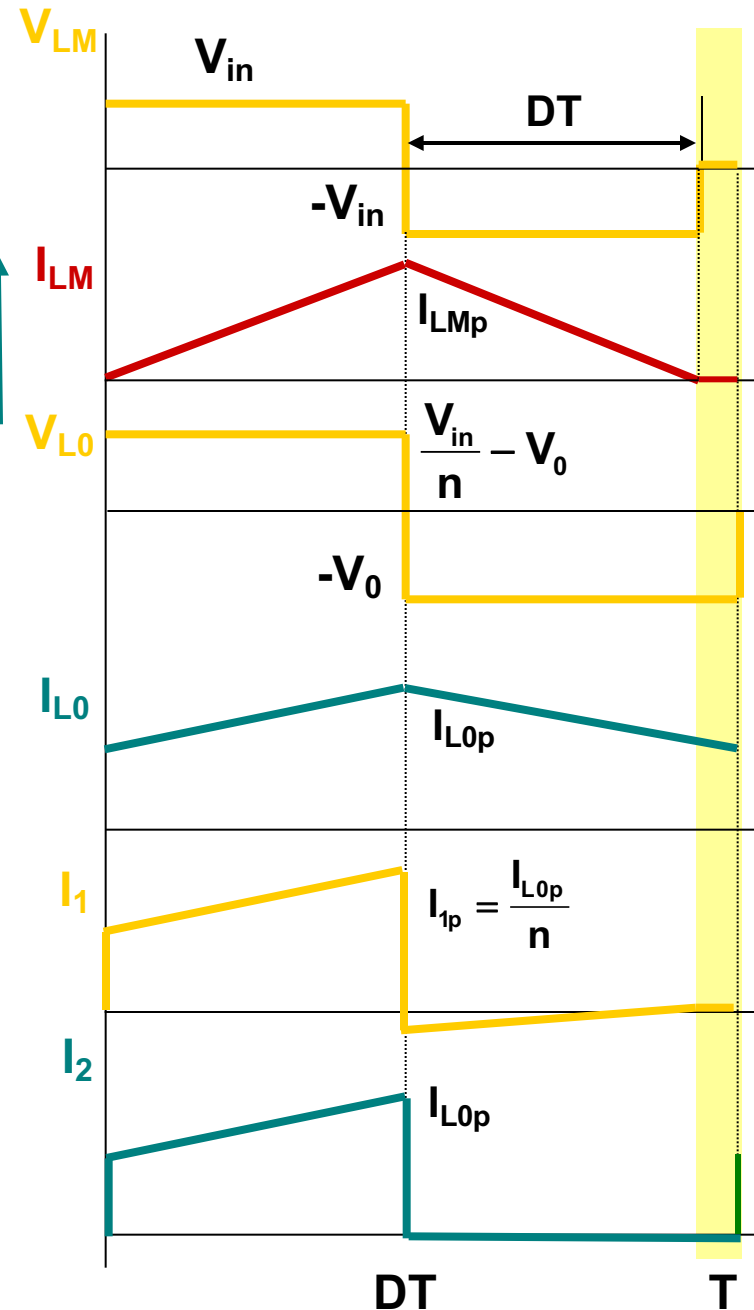
Funcionamiento del convertidor Forward en MCC

Fin de la desmagnetización de L_0



En este intervalo finaliza la desmagnetización de la bobina de salida.

La corriente I_{LM} no puede invertirse debido a la presencia del diodo del devanado auxiliar. Por tanto, esta corriente es cero durante este intervalo.



Desmagnetización de L_M

Genéricamente, el devanado auxiliar tendrá una relación de transf. n_{aux} . Por tanto, se cumplirá:

$$V_{in} \cdot D = V_{in} \cdot n_{aux} \cdot D_2$$

Si $n_{aux}=1$, entonces $D=D_2$

Esto implica que hay un ciclo de trabajo máximo. Suponiendo que en el caso límite $D_2=1-D$, tenemos:

$$D_{max} = \frac{n_{aux}}{1 + n_{aux}}$$

P.ej: si $n_{aux}=1$ entonces $D_{max} = 0.5$

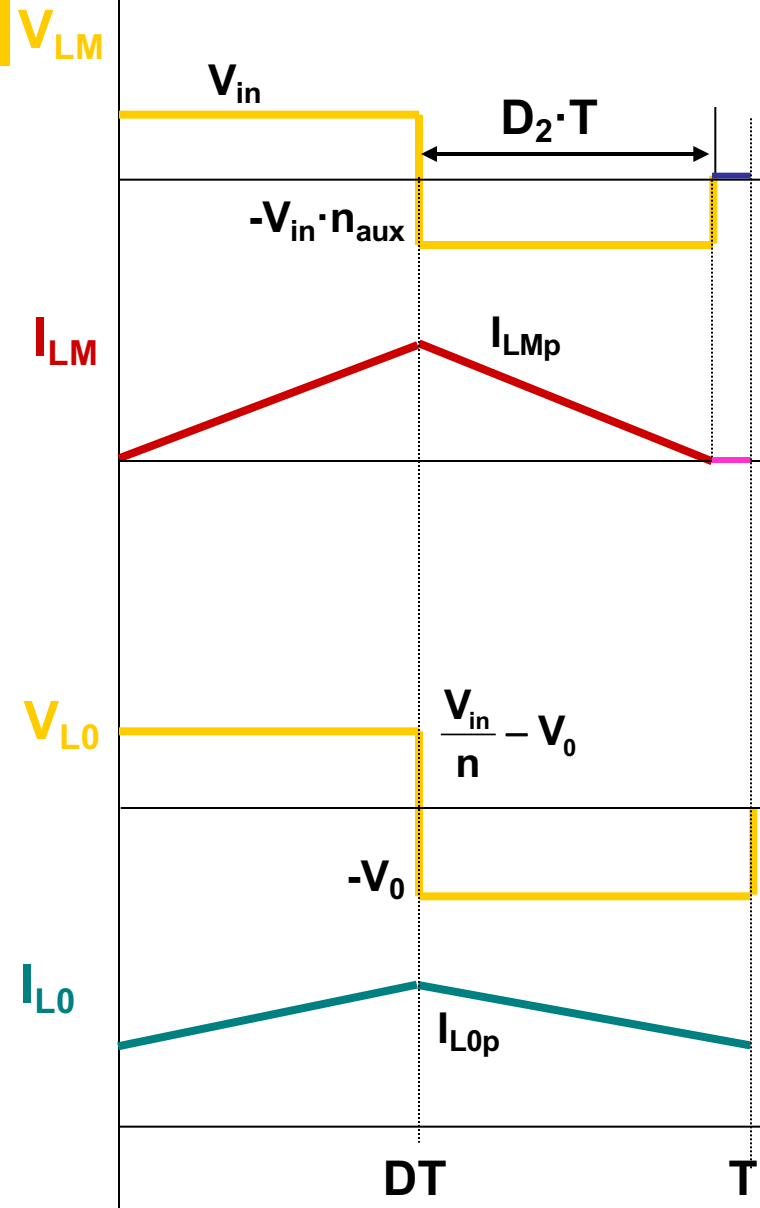
Valor de la tensión de salida

La bobina de salida también debe estar equilibrada. Por tanto:

$$\left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D = V_0 \cdot (1 - D)$$

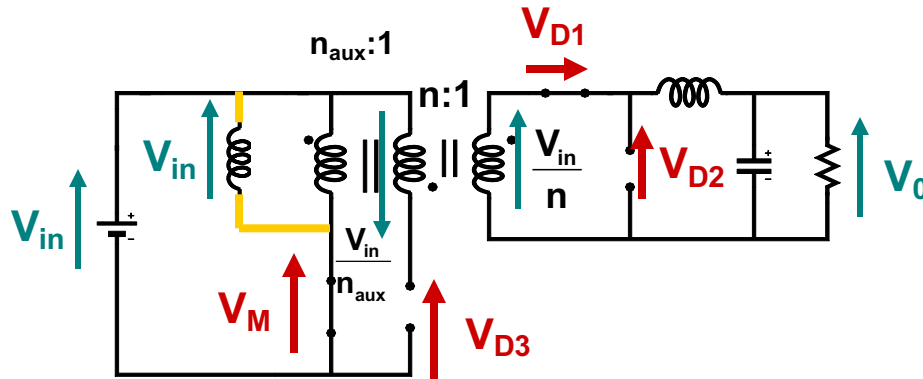
$$V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot D$$

Se comporta igual que un reductor



Esfuerzos en los semiconductores

Carga de la bobina de salida L_0 y de L_M

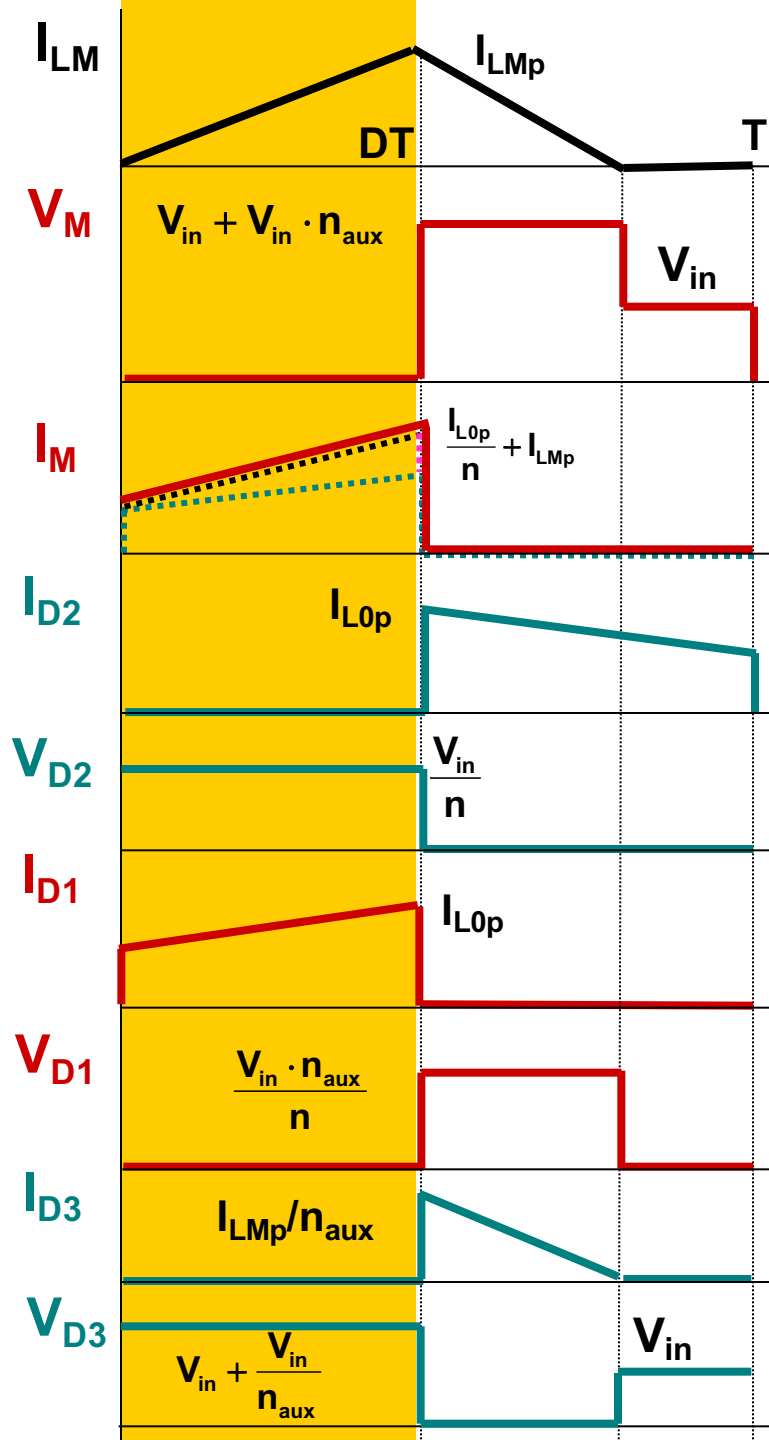


$$V_M = 0$$

$$V_{D1} = 0$$

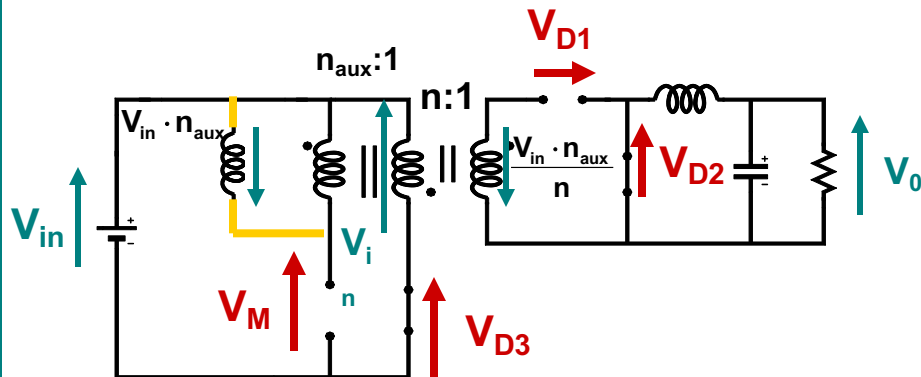
$$V_{D2} = V_{in}/n$$

$$V_{D3} = V_{in} + V_{in}/n_{aux}$$



Esfuerzos en los semiconductores

Descarga de L_0 y de L_M

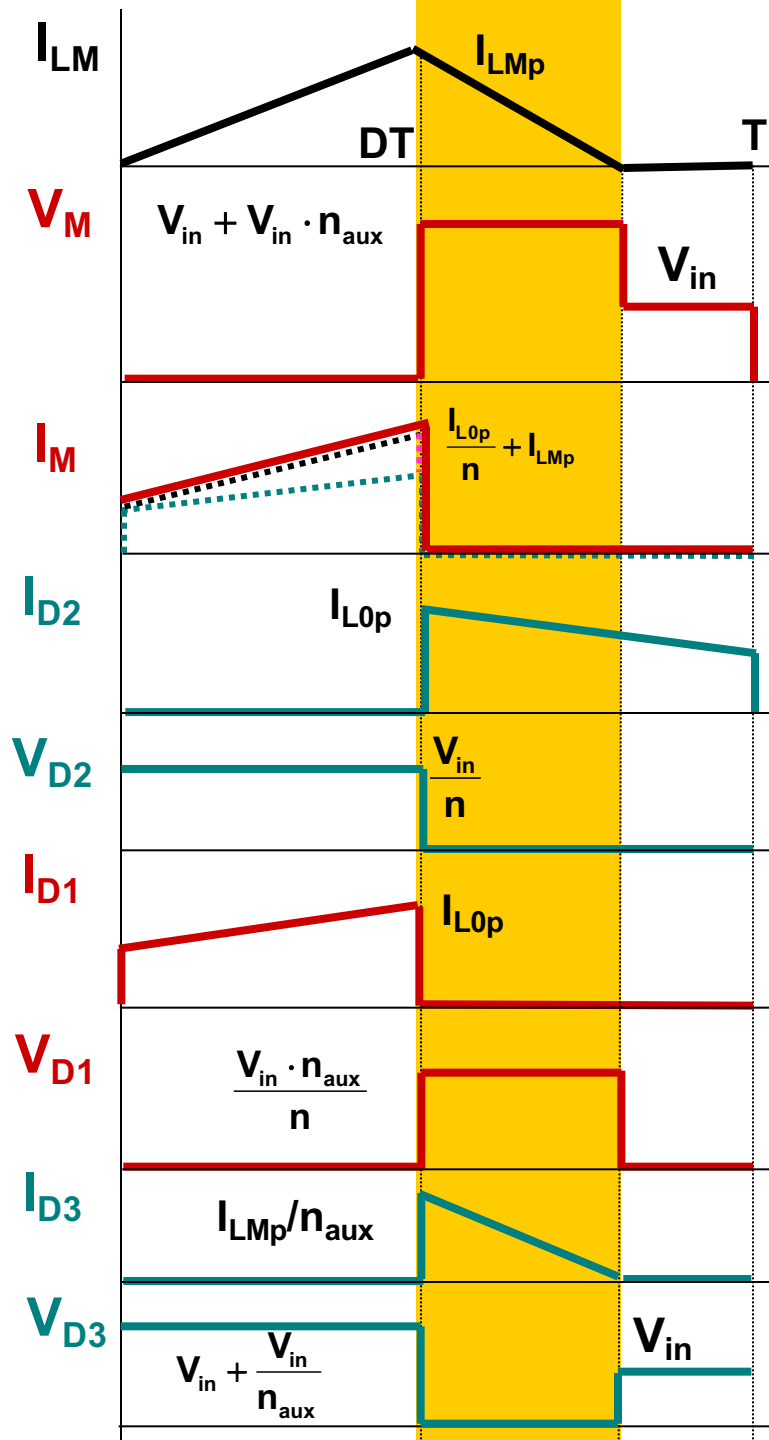


$$V_M = V_{in} + V_{in} \cdot n_{aux}$$

$$V_{D1} = V_{in} \cdot n_{aux} / n$$

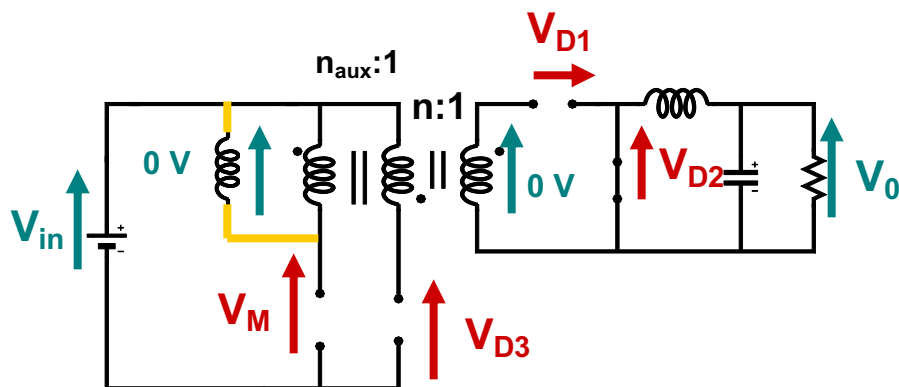
$$V_{D2} = 0$$

$$V_{D3} = 0$$



Esfuerzos en los semiconductores

Fin de la desmagnetización de L_0



$$V_M = V_{in}$$

$$V_{D1} = 0$$

$$V_{D2} = 0$$

$$V_{D3} = V_{in}$$

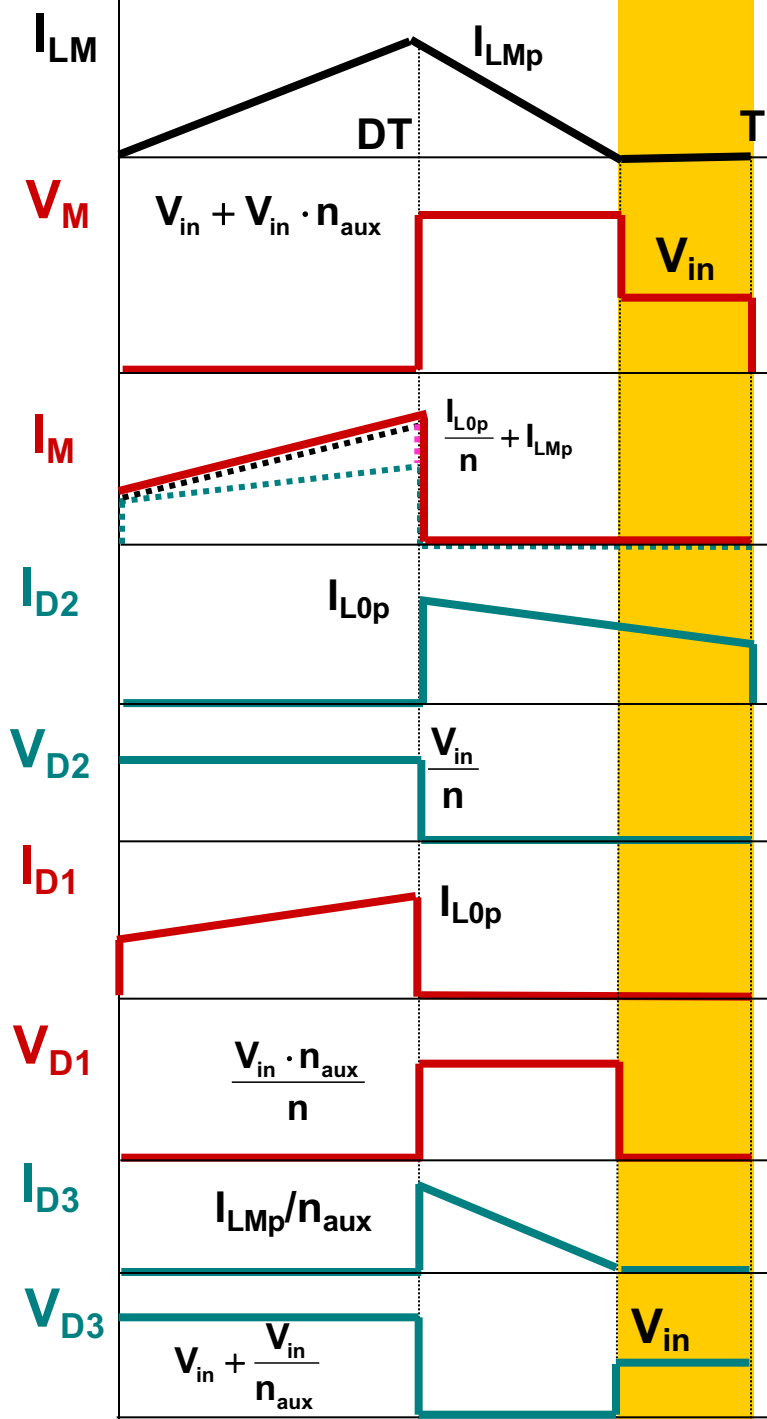
Los esfuerzos máximos son:

$$V_M = V_{in} + V_{in} \cdot n_{aux}$$

$$V_{D1} = V_{in} \cdot n_{aux} / n$$

$$V_{D2} = V_{in} / n$$

$$V_{D3} = V_{in} + V_{in} / n_{aux}$$

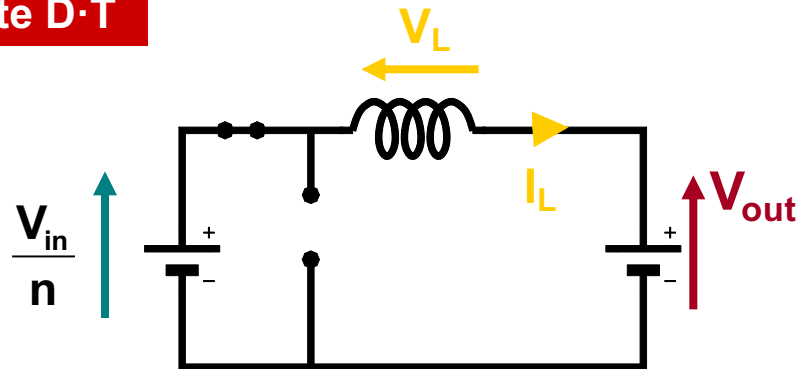


Límite entre MCC y MCD

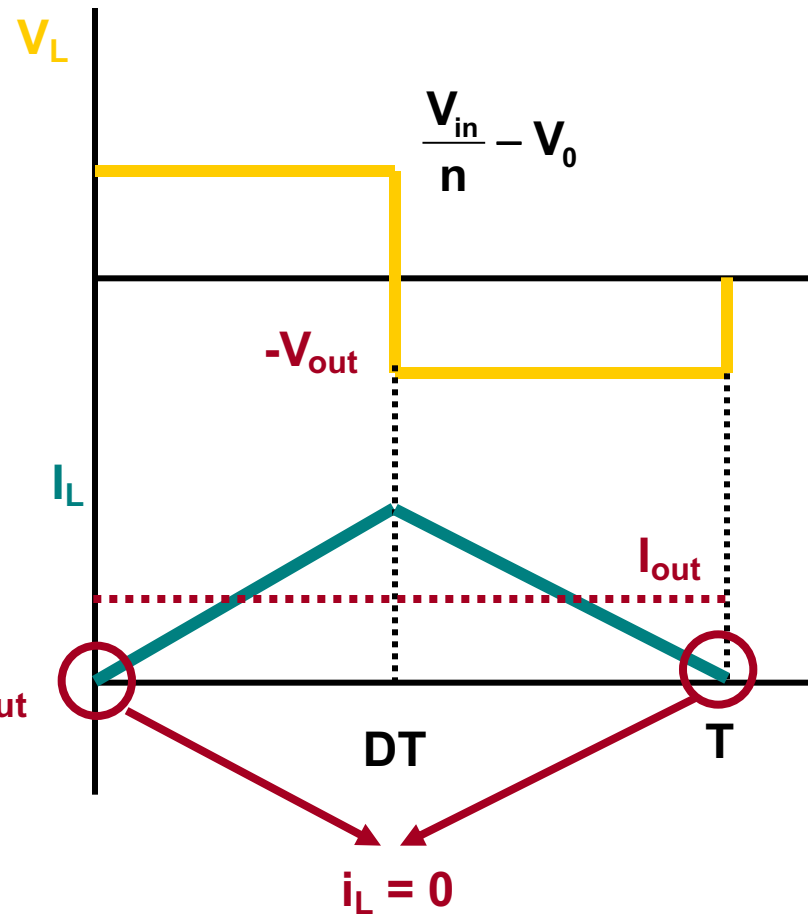
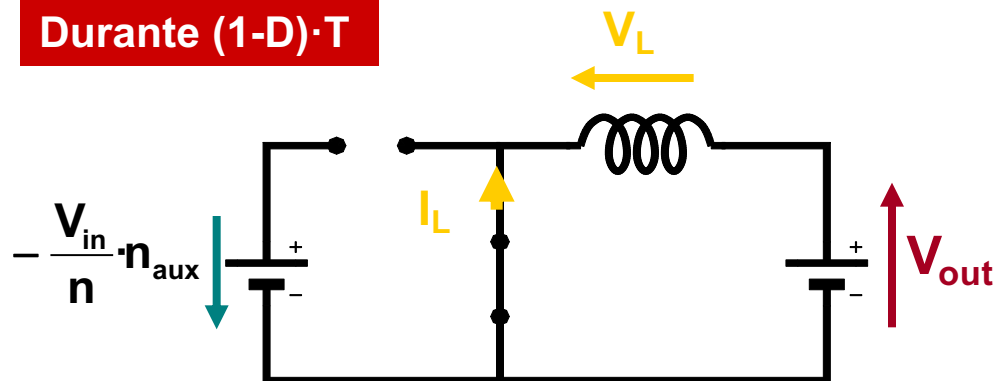
Se trata del MCD en la bobina de salida. Es prácticamente igual al caso del convertidor reductor

Sigue habiendo 2 estados de funcionamiento

Durante $D \cdot T$



Durante $(1-D) \cdot T$



Se sigue cumpliendo la expresión obtenida en MCC: $V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

Límite entre MCC y MCD

La corriente está en el límite entre MCC y MCD

Dado un valor de I_{out} , ¿Qué valor de L consigue obtener esta corriente?

La corriente de pico es:

$$I_{Lp0} = \frac{1}{L_0} \cdot \left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D \cdot T$$

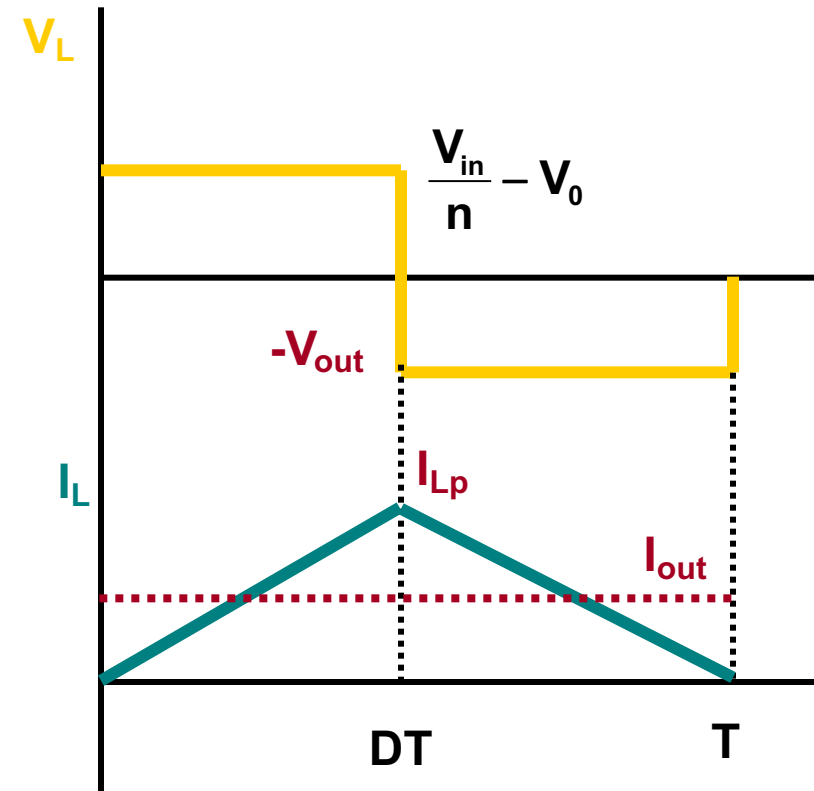
El valor medio de la corriente I_L es la corriente de salida:

$$I_0 = \bar{I}_{L0} = \frac{1}{2} I_{Lp0} = \frac{1}{2L_0} \cdot \left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D \cdot T$$

Se cumple: $V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

Por tanto:

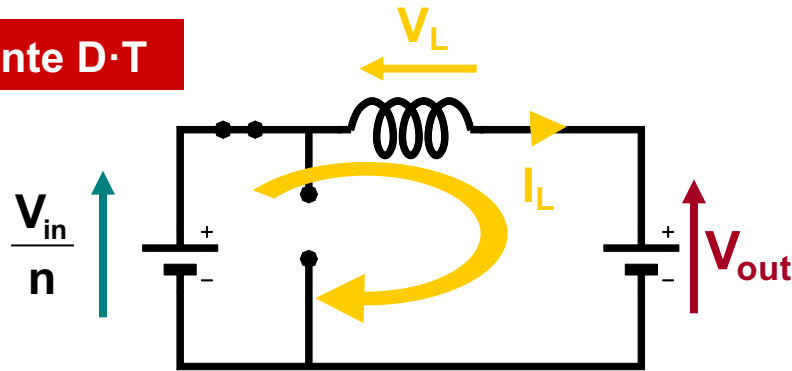
$$L_{lim} = \frac{V_0 \cdot T}{2 \cdot I_0} \cdot (1 - D)$$



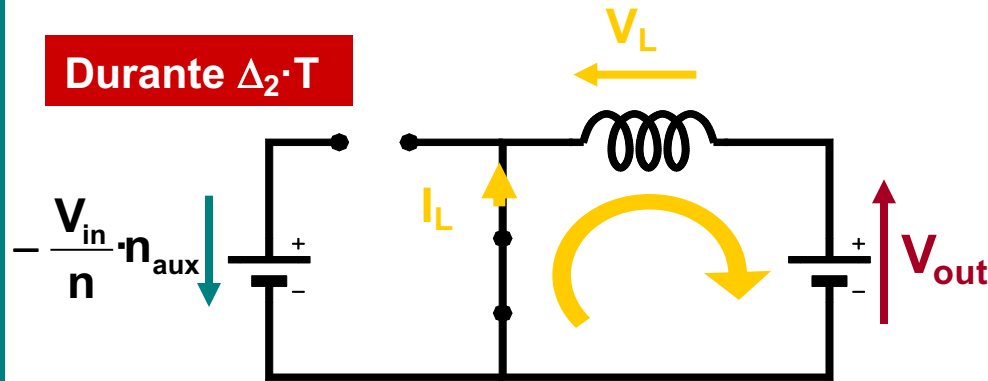
Operación en MCD

Hay 3 estados de funcionamiento. Exactamente igual al reductor

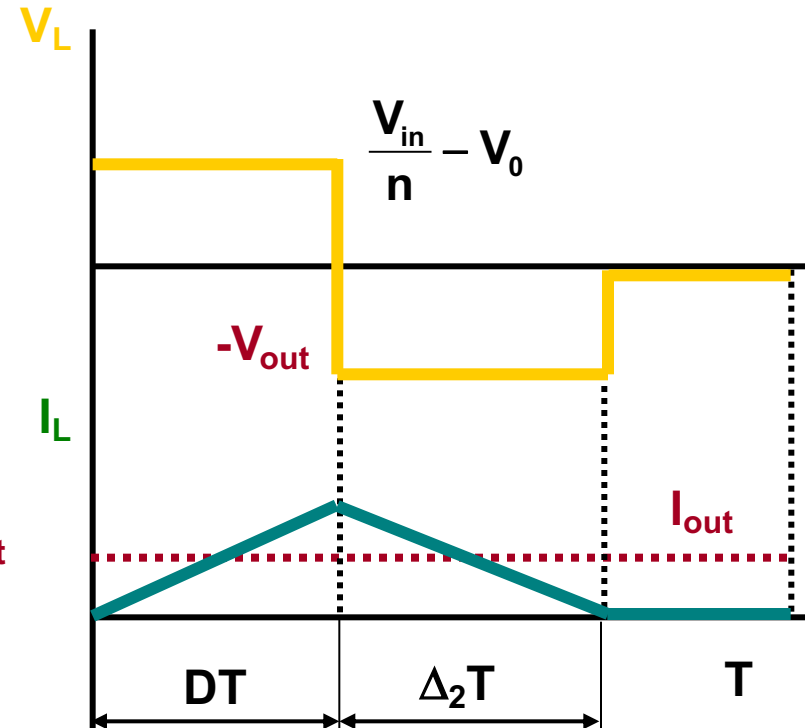
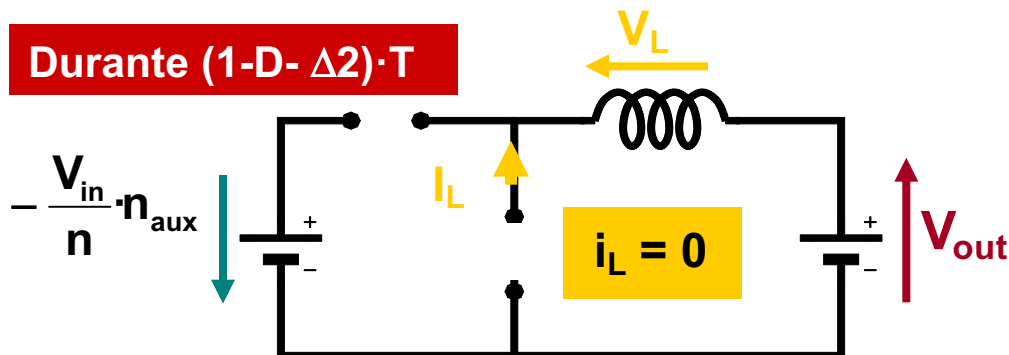
Durante $D \cdot T$



Durante $\Delta_2 \cdot T$



Durante $(1-D-\Delta_2) \cdot T$



Cálculo de la relación de transformación

En general, cuando un convertidor se descarga pasa a operar en MCD

En MCD se cumple:

Tensión media en L nula:

$$\left(\frac{V_{in}}{n} - V_{out} \right) \cdot D = V_{out} \cdot \Delta_2$$

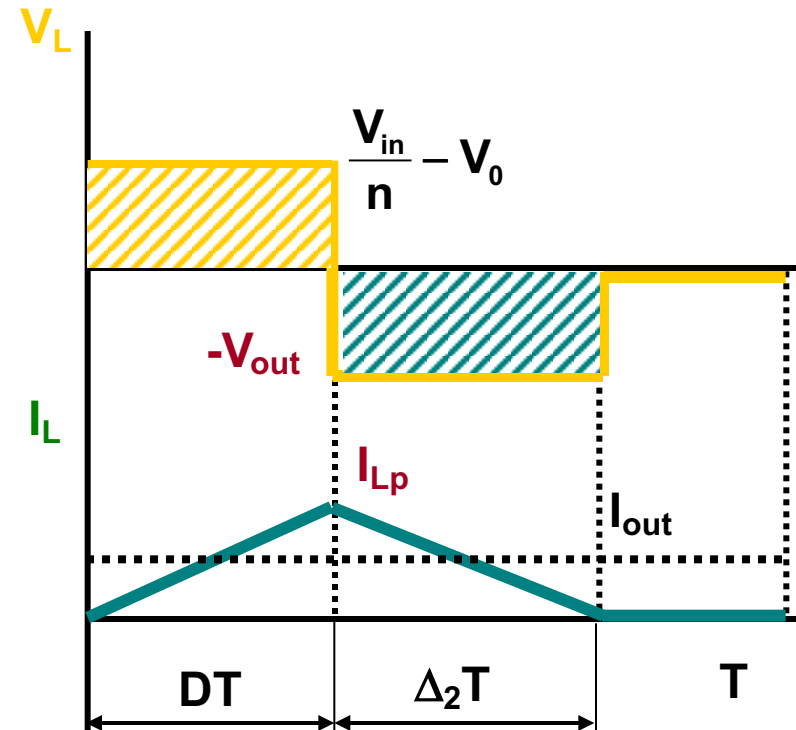
La corriente de pico es:

$$I_{Lp0} = \frac{1}{L_0} \cdot V_0 \cdot \Delta_2 \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{Lp0} (D + \Delta_2) \quad \bigg| \quad I_0 = \frac{V_0}{R_L}$$

$$D = \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L_0}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}}}}$$



R_L es la carga de salida

Operación en MCD

$$D = \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L_0}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}}}}$$

El ciclo de trabajo depende de la carga

El valor de L también influye en el ciclo de trabajo

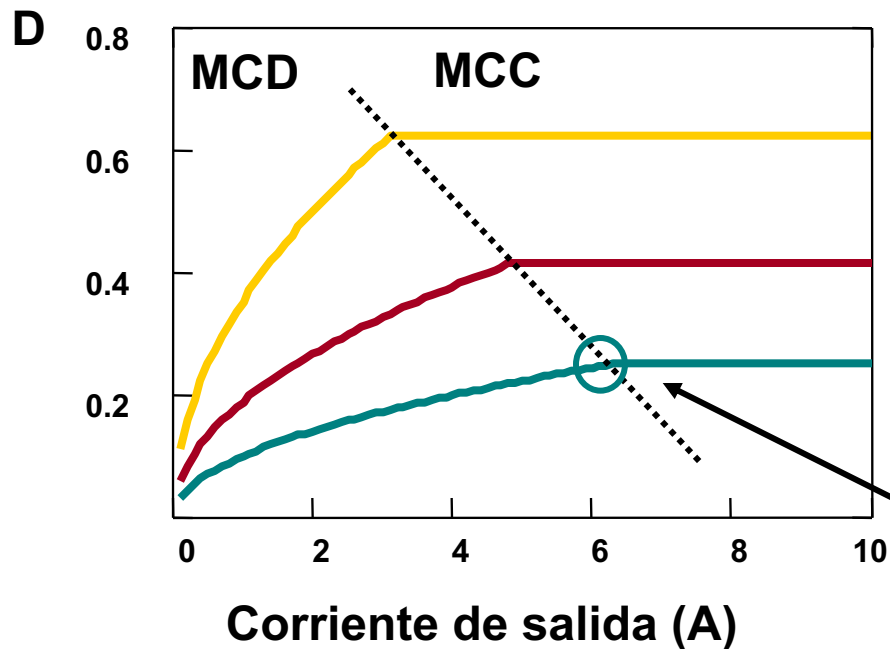
Ejemplo

$$V_{out} = 5 \text{ V}$$

$$L = 5 \mu\text{H}$$

$$f = 100 \text{ kHz}$$

$$n = 15$$



$$V_{in} = 200 \text{ V}$$

$$V_{in} = 300 \text{ V}$$

$$V_{in} = 400 \text{ V}$$

Peor caso:
 V_{inmax}

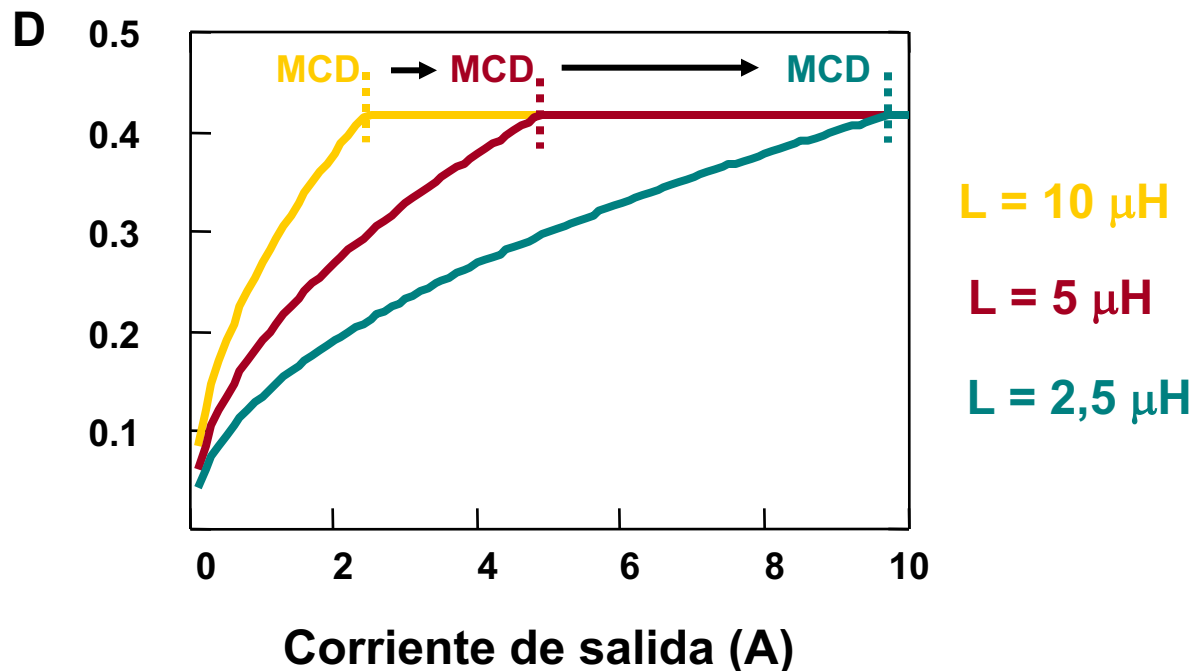
Operación en MCD

El valor de L influye en el ciclo de trabajo

Ejemplo

$$V_{in} = 300 \text{ V}$$

$$V_{out} = 5 \text{ V}$$

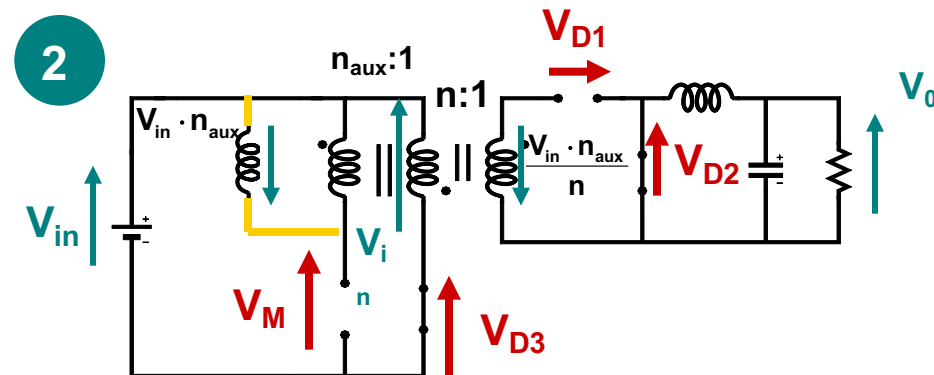
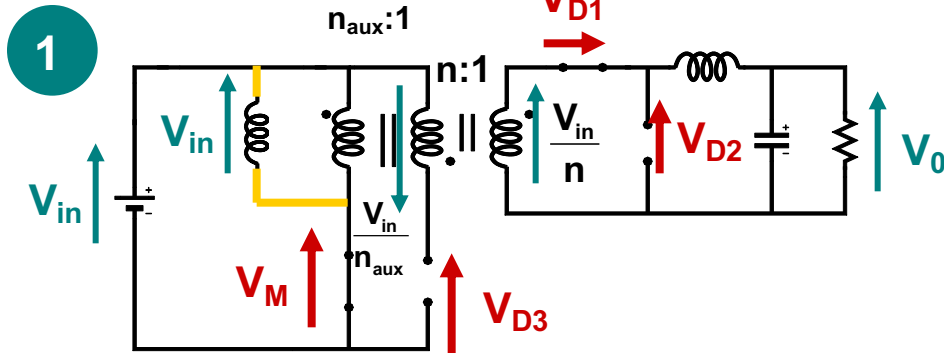


Cuanto más grande es la bobina, el convertidor trabaja en MCC hasta cargas más bajas.

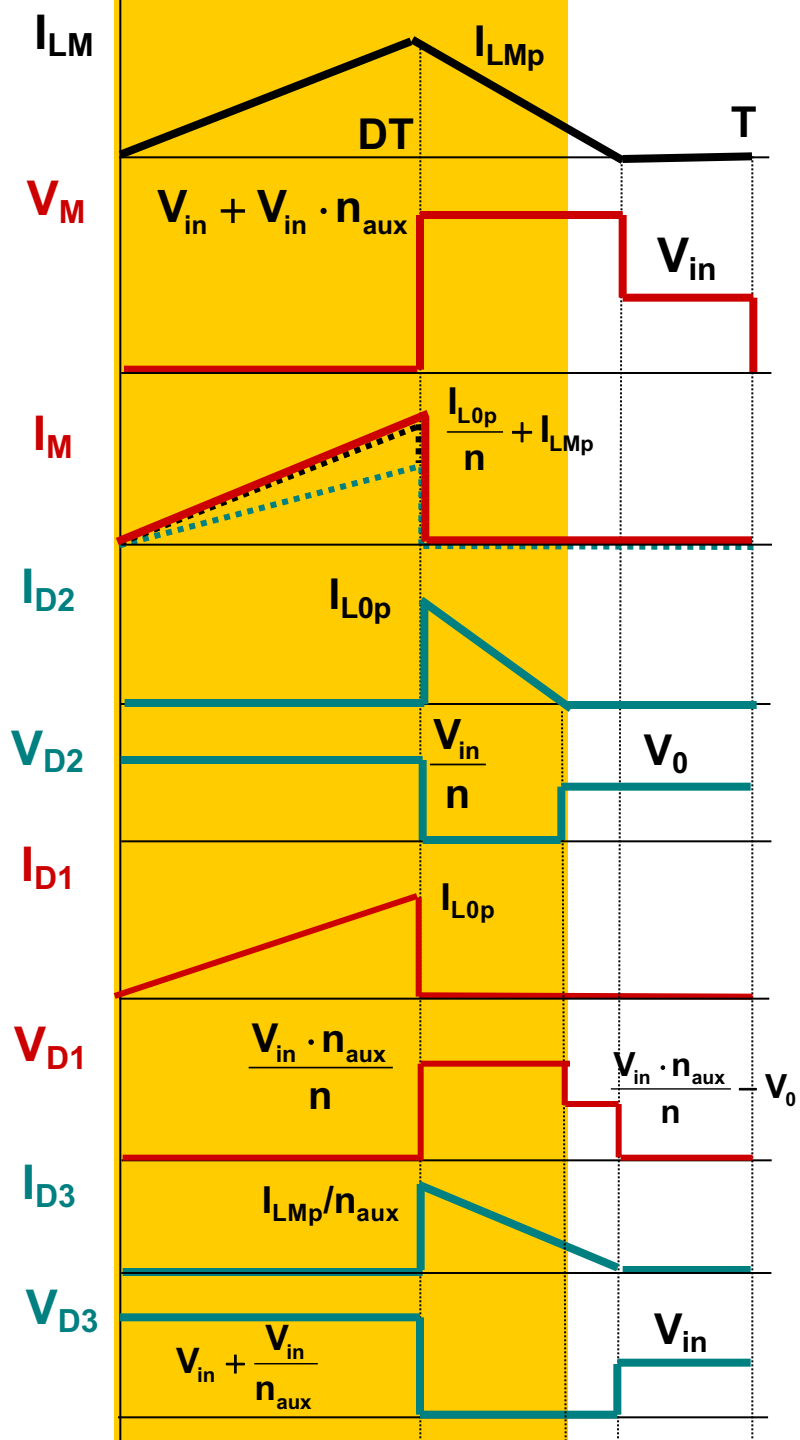
Esfuerzos en los semiconductores

MCD

Las dos primeras etapas son similares al MCC



Los esfuerzos máximos son los mismos que en MCC

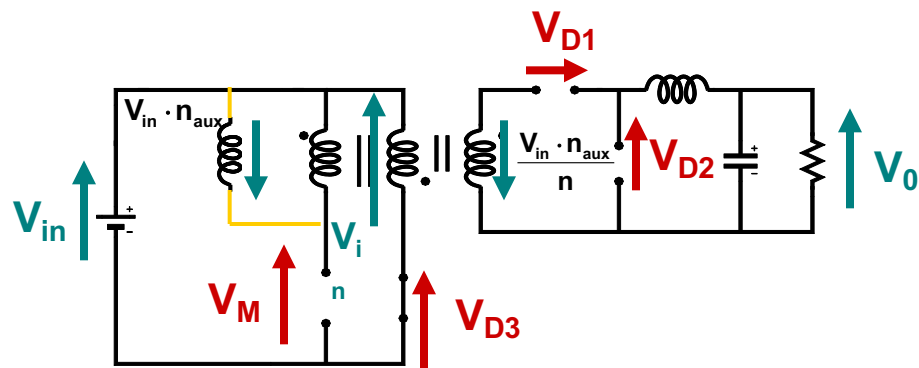


Esfuerzos en los semiconductores

MCD

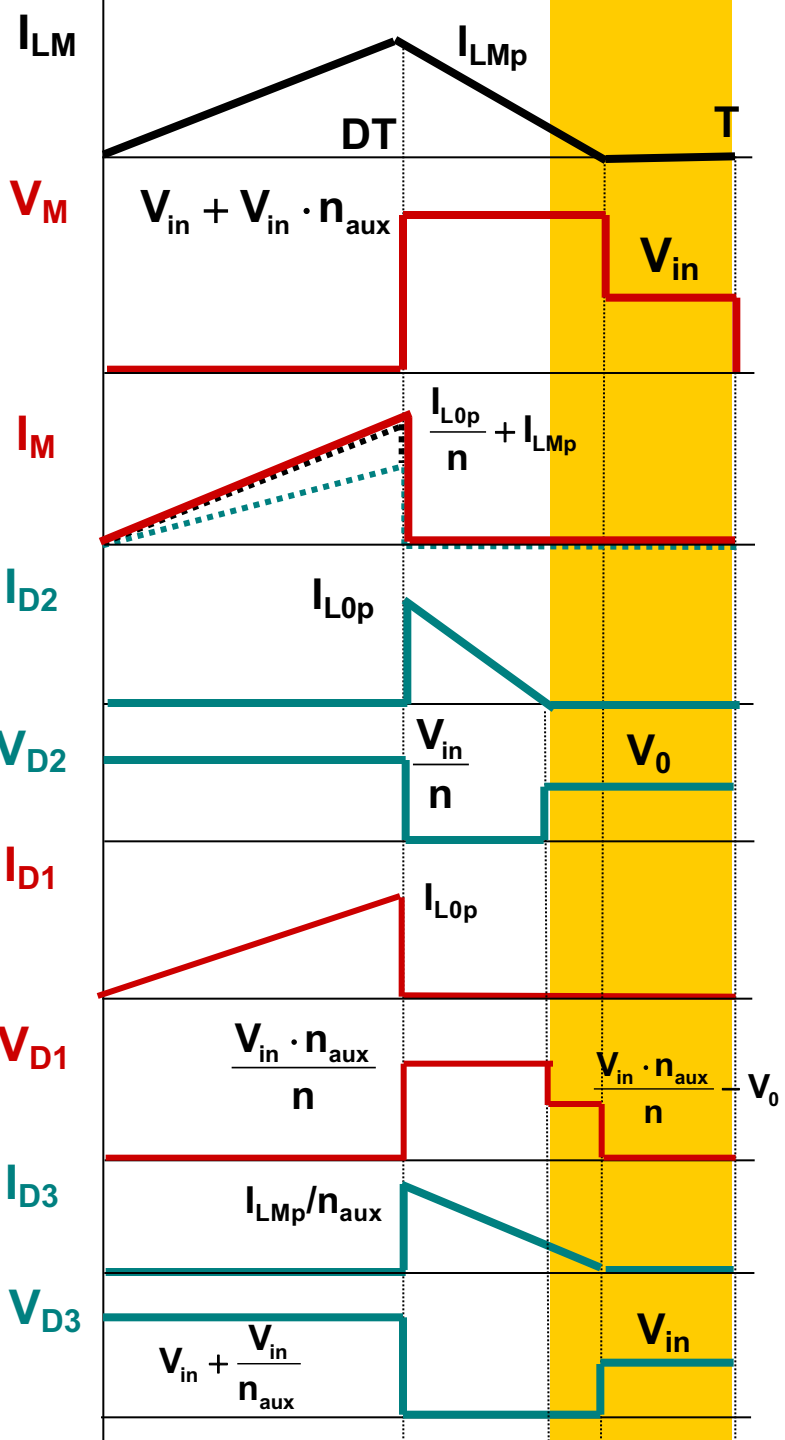
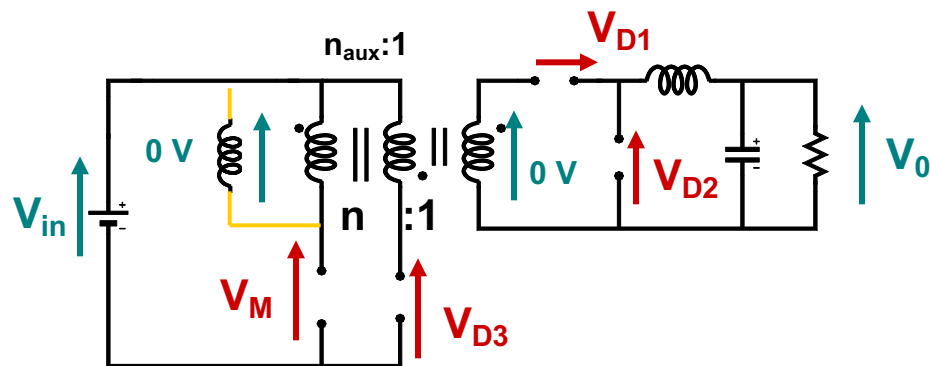
3

- $i_{L0} = 0$
- Desmagnetización i_{LM}



4

- $i_{L0} = 0$
- $i_{LM} = 0$



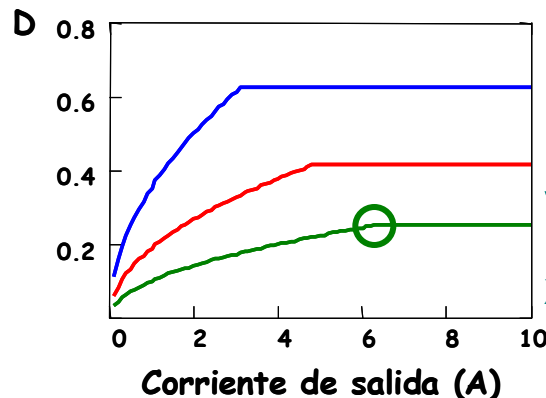
Si deseamos que el convertidor pase de MCD a MCC en un cierto valor de potencia (P_{lim}), conocemos la corriente media de salida:

$$I_{0L} = \frac{P_{lim}}{V_{out}}$$

Si el convertidor va a operar dentro de un rango de tensión de entrada, debemos conseguir que en ningún caso, sea cual sea la tensión de entrada, el convertidor opere en MCD por encima de P_{lim} . Por tanto, debemos tomar el caso peor:

Tensión de entrada máxima con ciclo de trabajo mínimo.

Por tanto, con I_{0L} y D_{min} como datos ya podemos obtener el valor de la L necesaria:



V_{inMA}



D_{min}



$$L_{mcd} = \frac{V_0 \cdot T}{2 \cdot I_{0L}} \cdot (1 - D_{min})$$

Cálculo del condensador

El rizado pico-pico en el condensador será:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_{L0}}{2} \cdot \frac{T}{2}$$

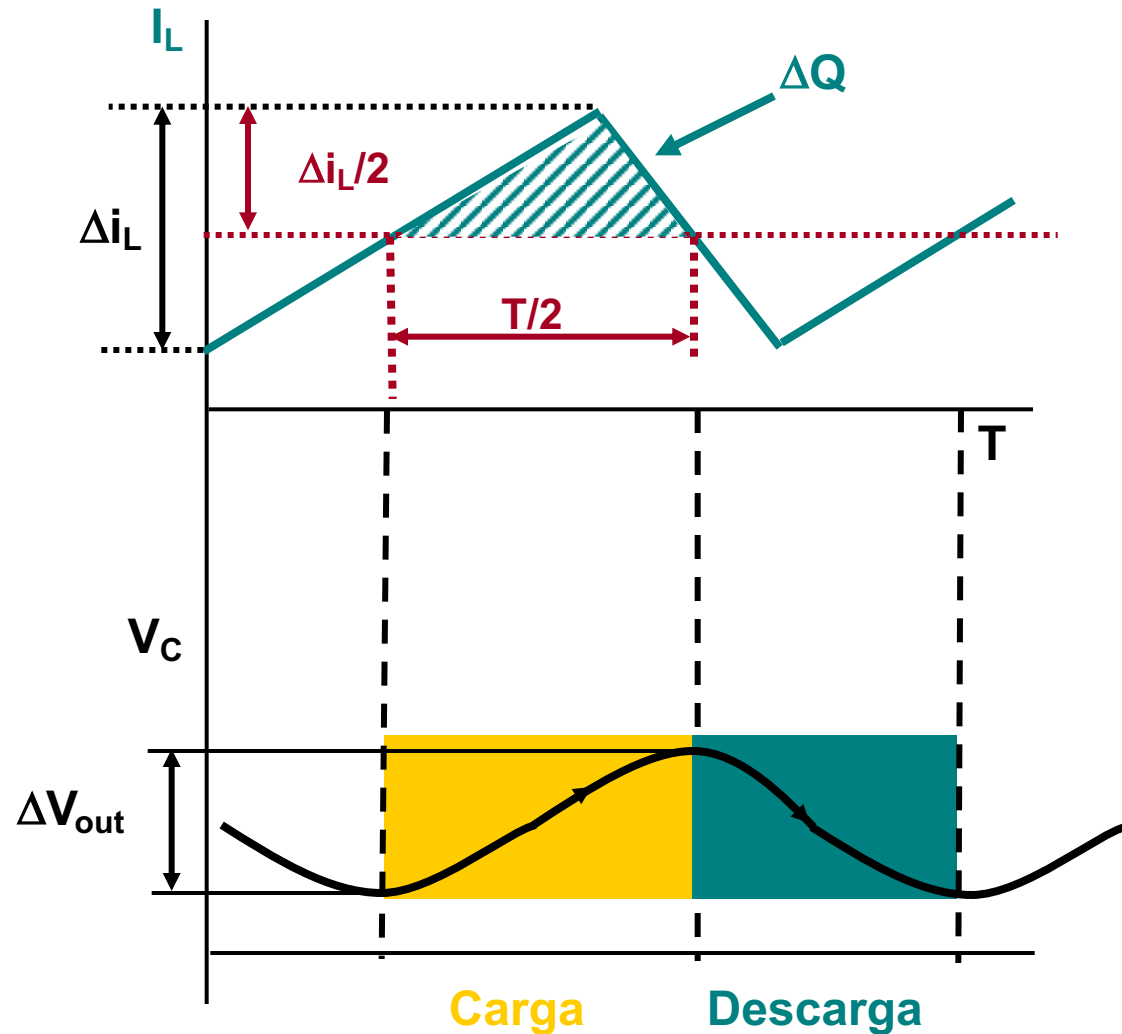
Durante (1-D):

$$\Delta I_{L0} = \frac{V_0}{L_0} \cdot (1-D) \cdot T$$

Por tanto:

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 \cdot T^2}{8 \cdot L_0 \cdot C} \cdot (1-D)$$

Formas de onda



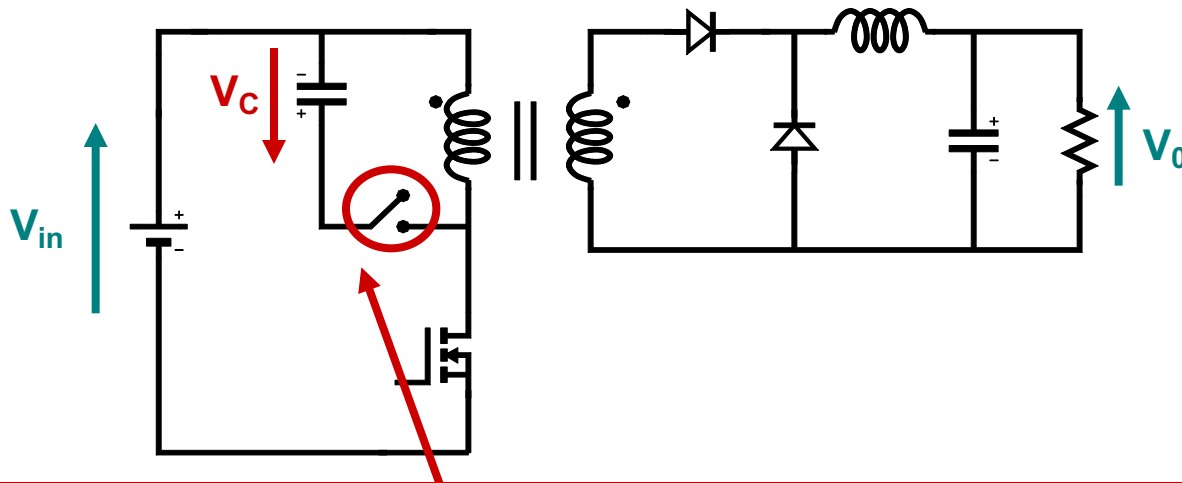
Conocido el valor de L y tomando como dato ΔV_{out} podemos calcular C

Otras alternativas para desmagnetizar

El convertidor Forward clásico utiliza un devanado adicional para desmagnetizar L_M

Es posible utilizar otros métodos que cumplen la misma función.

Por ejemplo, podemos desmagnetizarla colocándole en paralelo un condensador cargado.



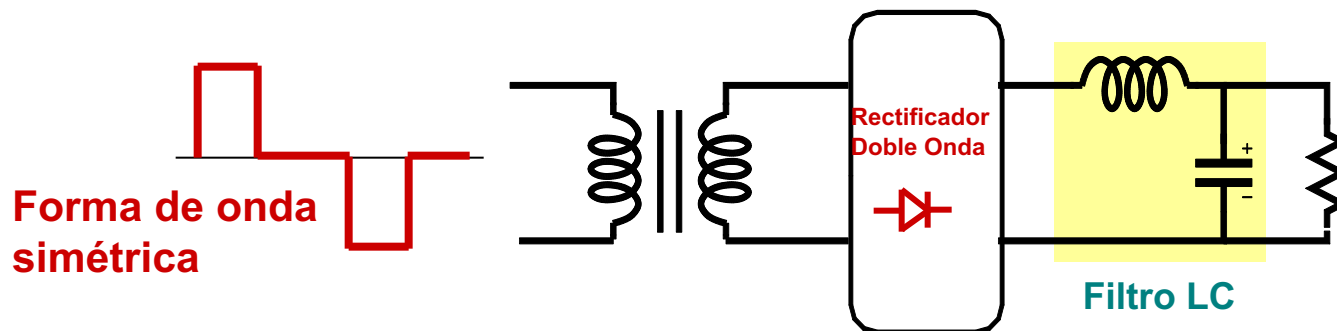
Controlando el interruptor adicional, podemos colocar el condensador cargado en el sentido adecuado para desmagnetizar el transformador.

A este método se le llama **Enclavamiento Activo** (*Active Clamp*).

Convertidores que manejan el transformador simétricamente

Estos convertidores se basan en un transformador con un rectificador de doble onda y un filtro LC.

Además, la forma de onda de la tensión que maneja el transformador es simétrica respecto a la línea de cero voltios.



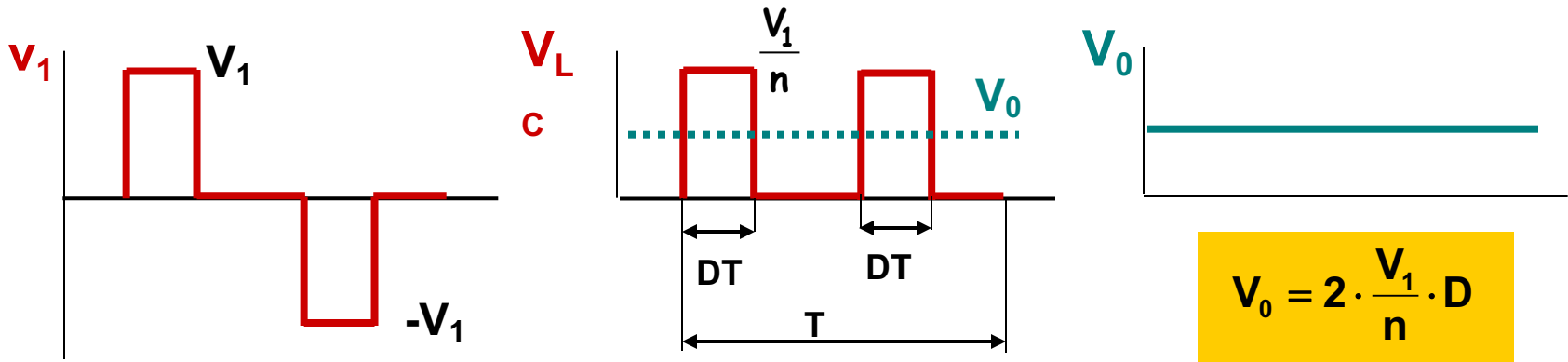
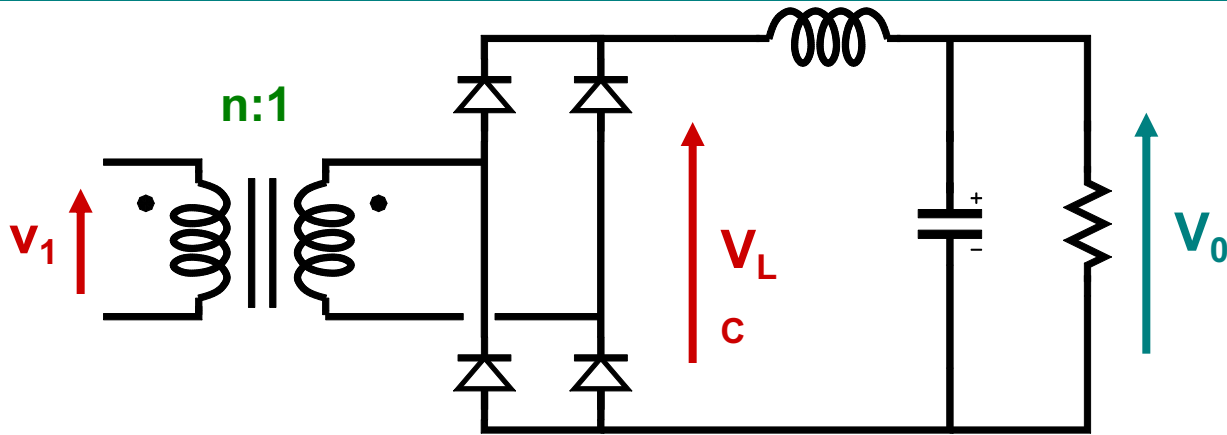
Respecto al rectificador, existen dos variantes:

- Rectificador de doble onda basado en un puente completo de diodos
- Rectificador de doble onda basado en un transf. con toma media

Respecto al circuito que genera la forma de onda del primario, hay tres opciones básicas:

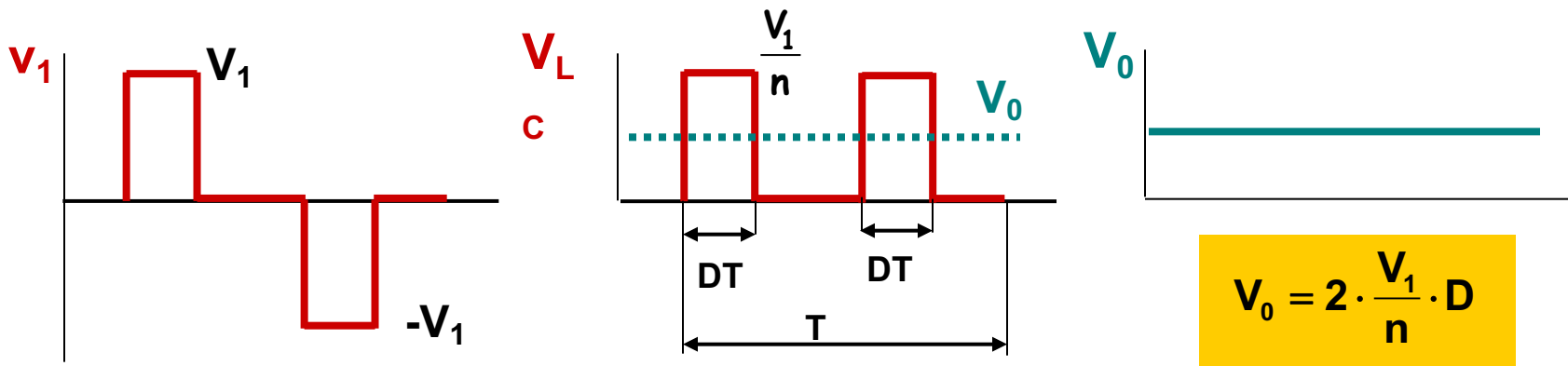
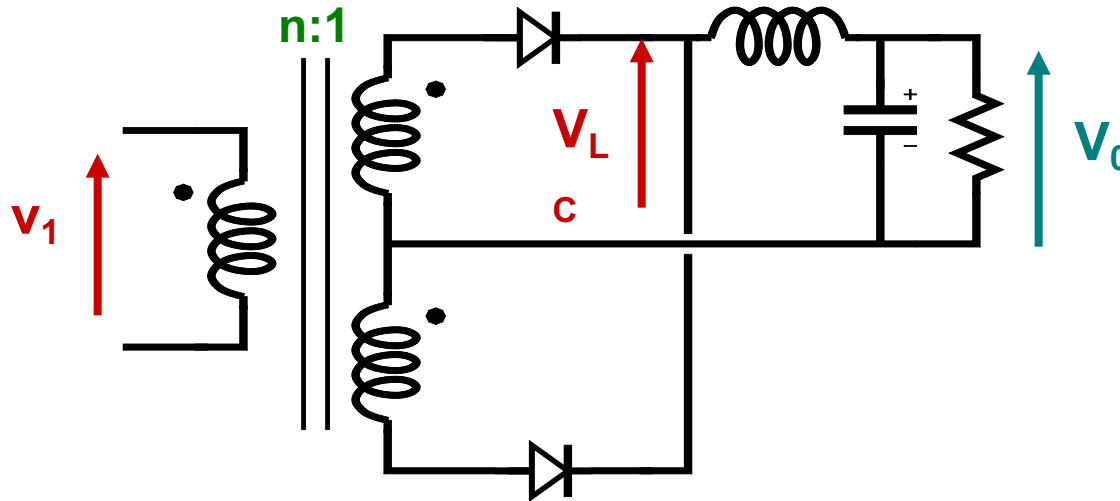
- Medio Puente
- Puente Completo
- Push-Pull

Rectificador de doble onda basado en un puente completo de diodos



- El filtro trabaja al doble de la frecuencia de la forma de onda del primario
- Siempre hay dos diodos en conducción
- Cada diodo soporta una tensión V_1/n

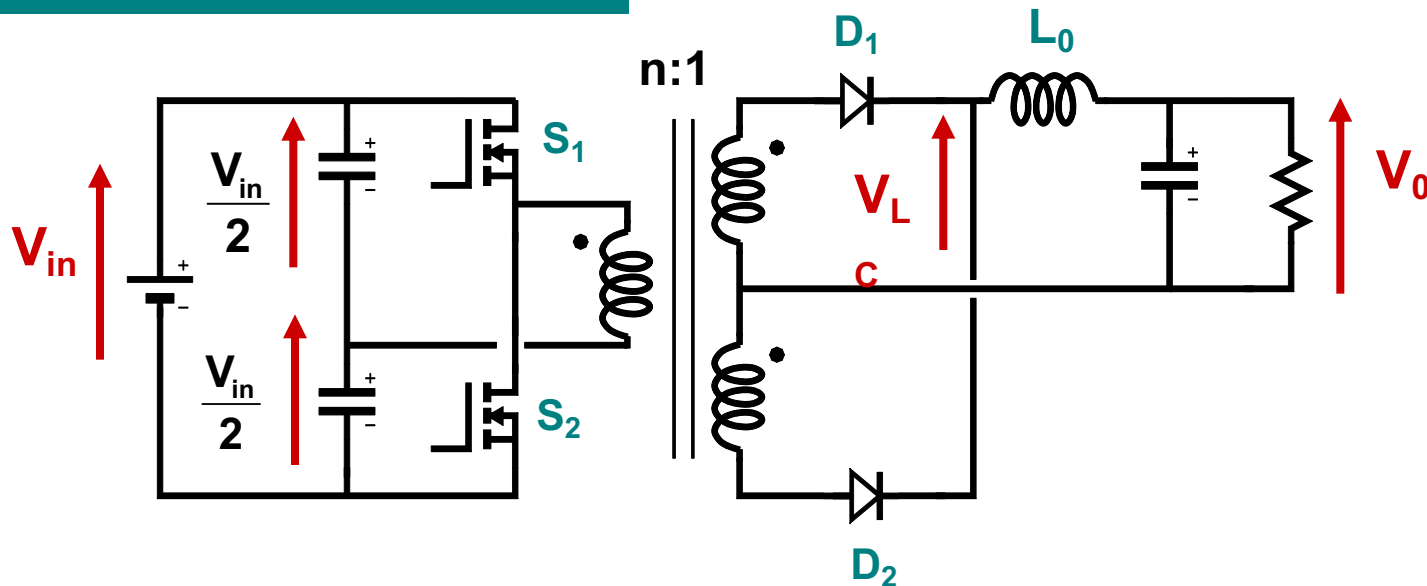
Rectificador de doble onda basado en un transformador con toma media



$$V_0 = 2 \cdot \frac{V_1}{n} \cdot D$$

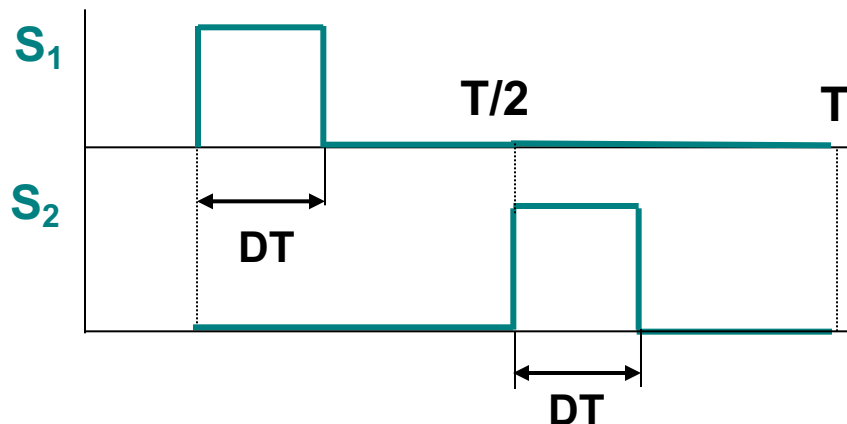
- El filtro trabaja al doble de la frecuencia de la forma de onda del primario
- Sólo hay un diodo en conducción en cada instante
- Cada diodo soporta una tensión $2 \frac{V_1}{n}$

Convertidor en Medio Punte



En la entrada se monta un divisor capacitivo mediante dos condensadores iguales y suficientemente grandes. De esta forma creamos un punto en el que la tensión es la mitad de la tensión de entrada.

Los dos MOSFET se manejan de la siguiente forma:



Señales de
puerta de los
MOSFETS

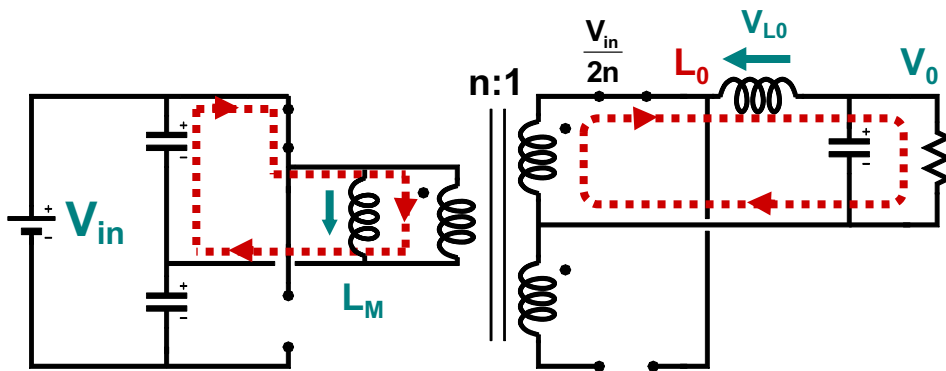
$D_{MAX} : 0.5$

Convertidor en Medio Puente. Circulación de corrientes

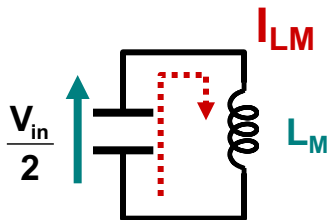
En MCC, estos convertidores tienen 3 estados de funcionamiento

1

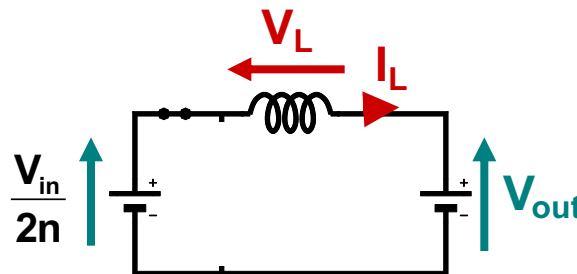
- Carga de la L_M
- Carga de L_0



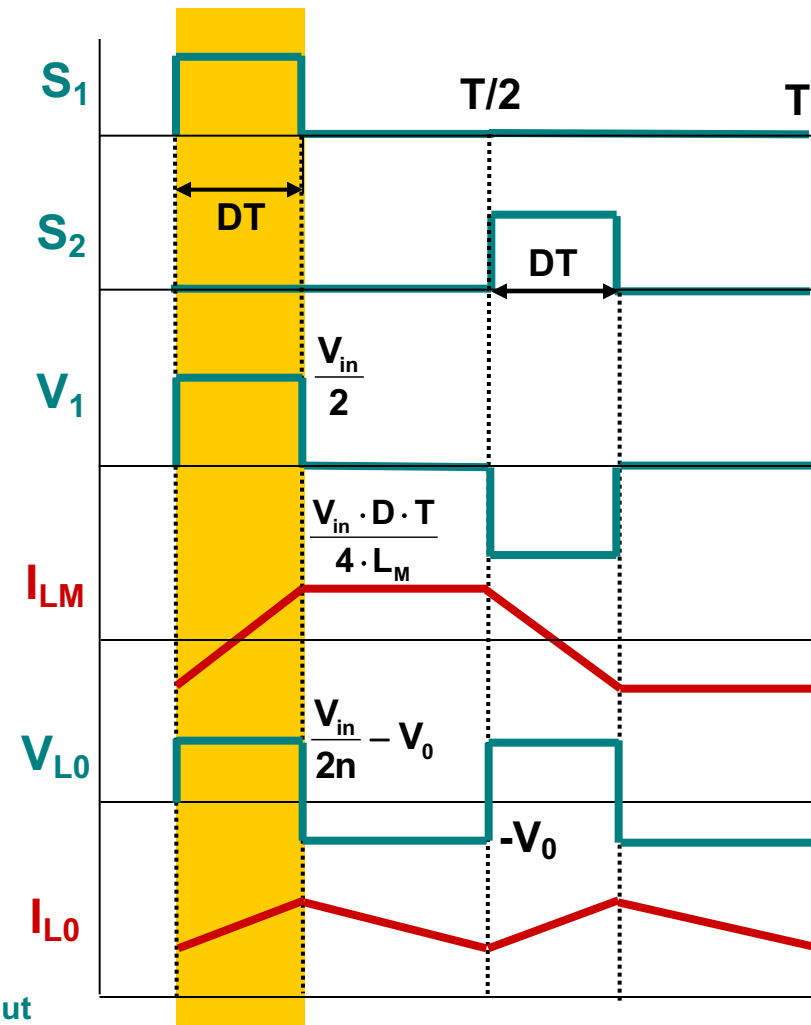
Durante $D \cdot T$



$$i_{LM}(t) = \frac{1}{L_M} \int \frac{V_{in}}{2} dt$$



$$i_{L_0}(t) = \frac{1}{L_0} \int \left(\frac{V_{in}}{2n} - V_0 \right) dt$$



El valor medio depende de la carga

$$I_0 = \frac{V_0}{R_L}$$

En $t = DT$

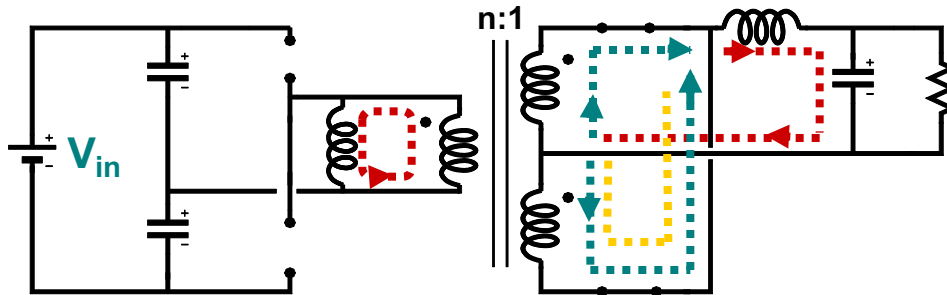
$$\Delta i_{LM} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{2 \cdot L_M}$$

El valor de pico es la mitad

Convertidor en Medio Puente. Circulación de corrientes

2

- L_M se mantiene
- Descarga de L_0

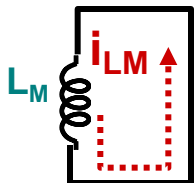


i_{LM} se cierra por el transformador

i_{LO} pone en conducción los dos diodos

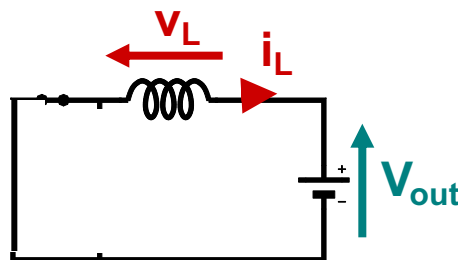
El equilibrio de corrientes en el transformador se debe mantener

La tensión en el transformador debe ser nula



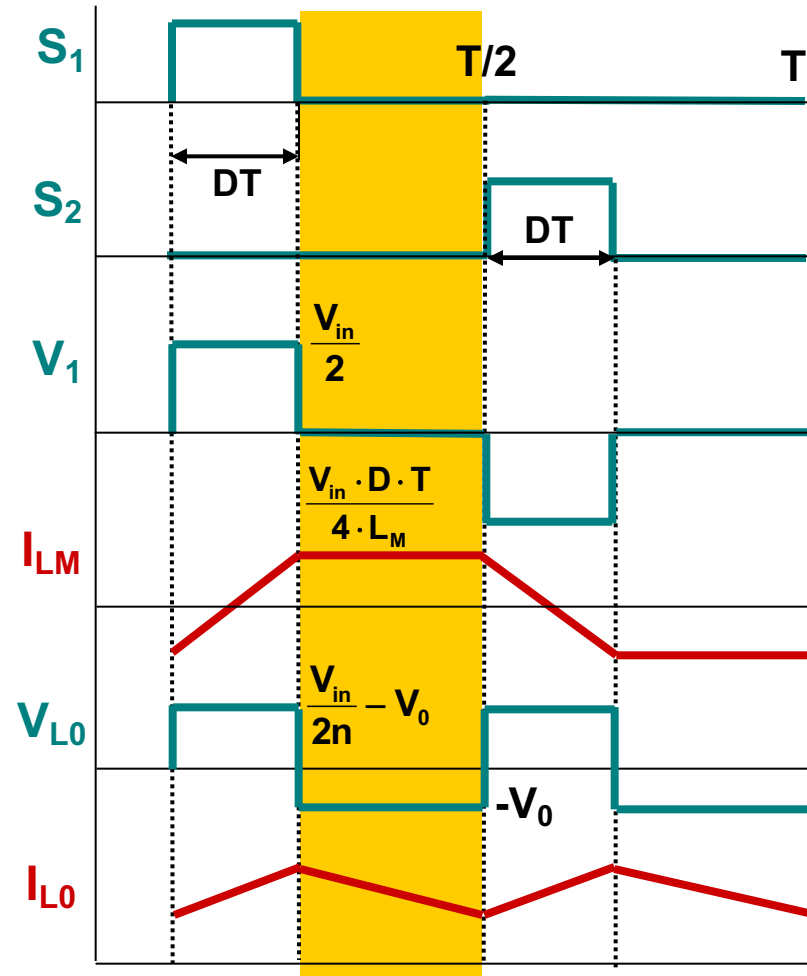
$$v_{LM} = 0$$

$$\Delta i_{LM} = 0$$



$$v_L = -V_0$$

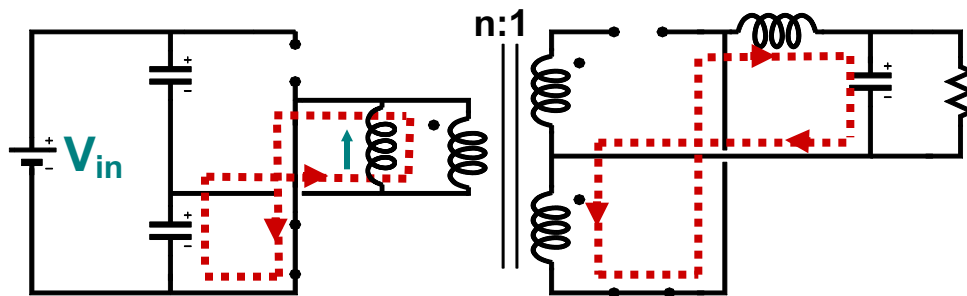
Se descarga L_0



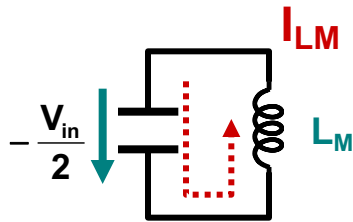
Convertidor en Medio Puente. Circulación de corrientes

3

- L_M se descarga
- Carga de L_0



Durante $D \cdot T$

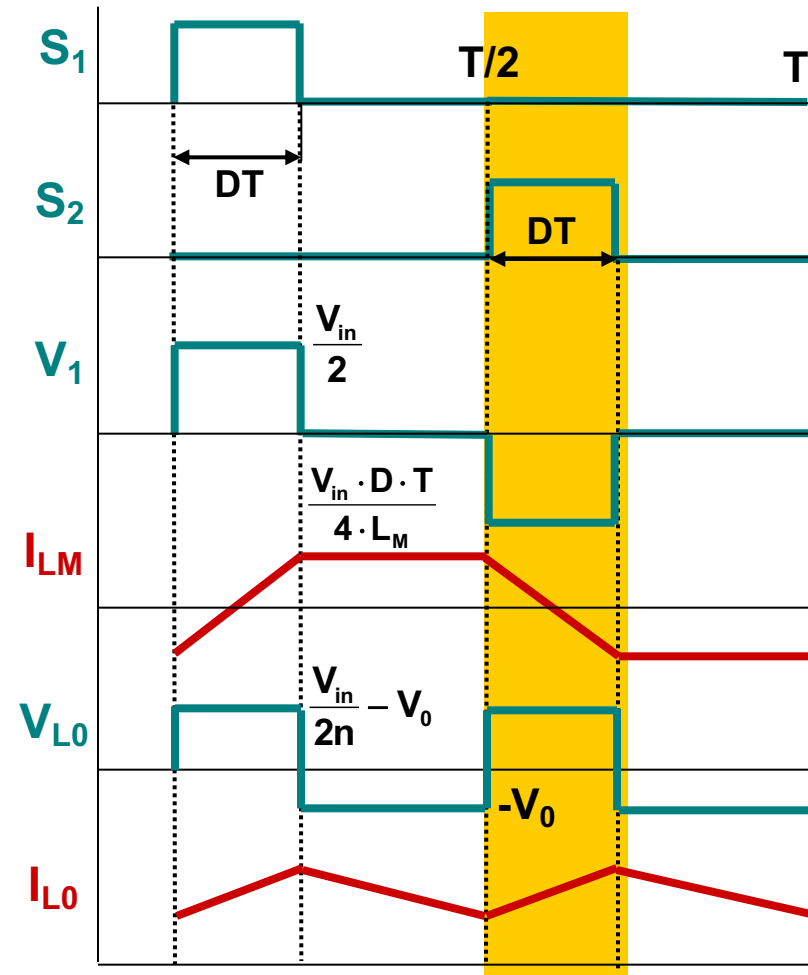


$$i_{LM}(t) = i_{LMp} - \frac{1}{L_M} \int \frac{V_{in}}{2} dt$$

$$i_{LMp} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{4 \cdot L_M}$$

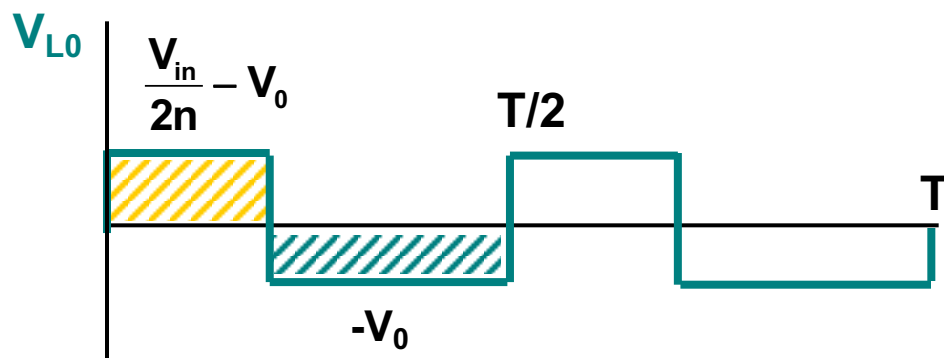
Se descarga L_M

El circuito de salida es igual al del primer modo.
Es simétrico



Convertidor en Medio Puente. Relación de transformación

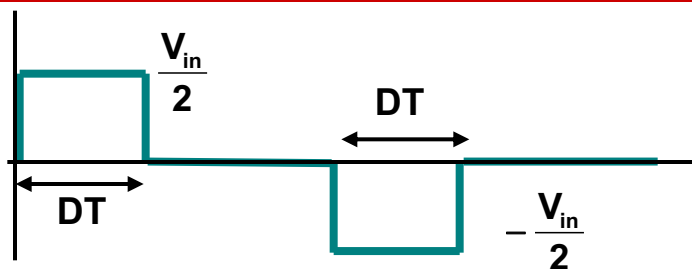
Para calcular la relación de transformación estudiamos la forma de onda de la tensión en la bobina de salida



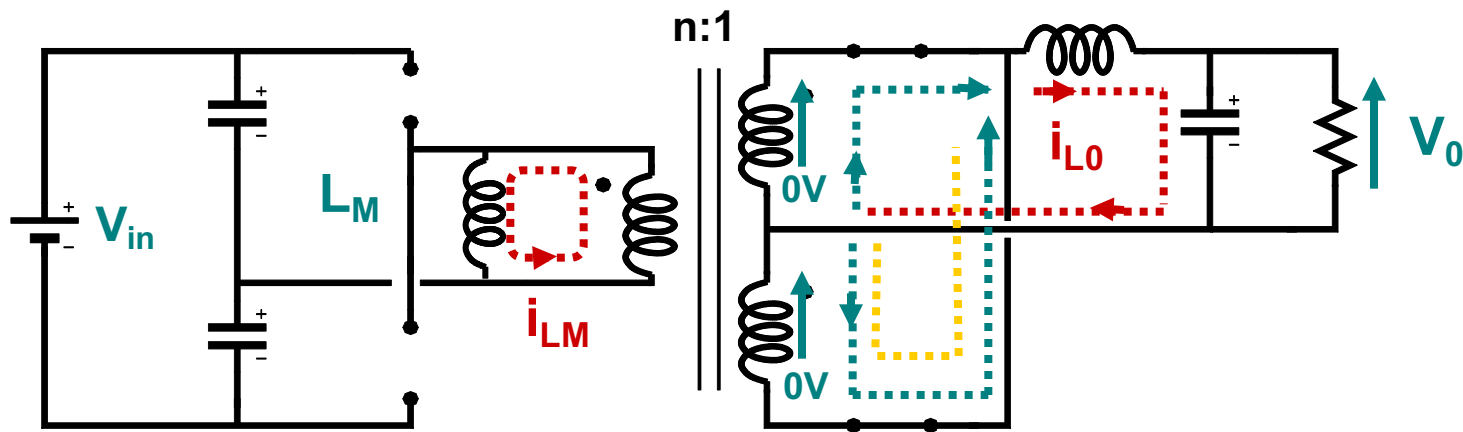
La bobina L_0 debe estar equilibrada: $\left(\frac{V_{in}}{2n} - V_0\right) \cdot D = V_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - D\right)$

Por tanto: $V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

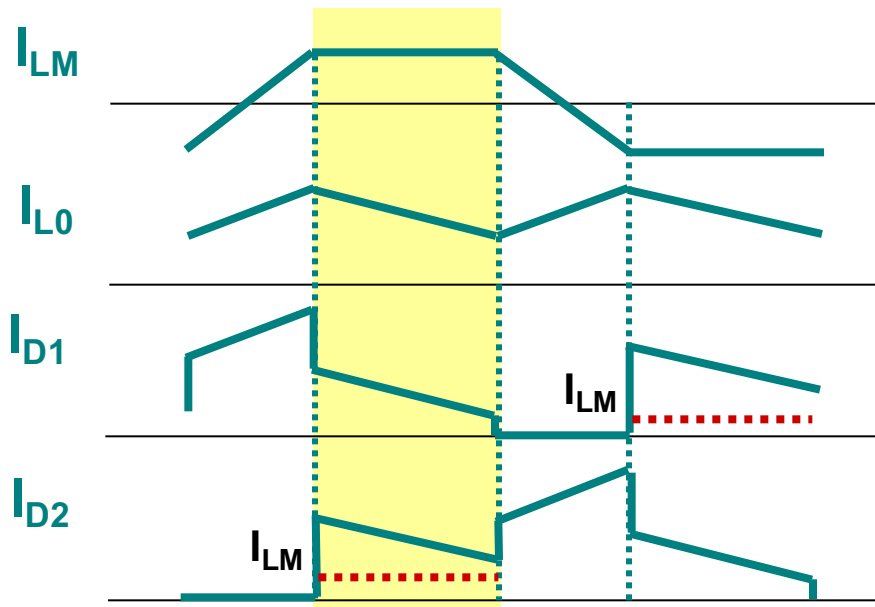
Con respecto a L_M , la forma de manejar los interruptores asegura que la forma de onda sea simétrica



i_{LM} estará equilibrada



Cuando los dos MOSFET están abiertos, la corriente i_{L0} debe seguir circulando. Para ello, los dos diodos se ponen a conducir y se reparten la corriente por igual. Únicamente se desequilibran ligeramente debido a que la corriente i_{LM} que también está entrando en el transformador debe salir por algún devanado del secundario. En general esta corriente será mucho menor que i_{L0} y apenas se notará el desequilibrio.



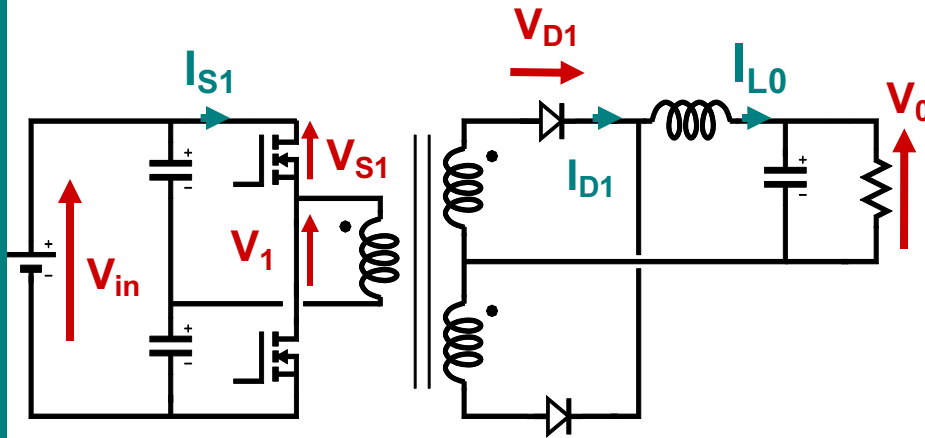
$$I_{L0} \approx I_{D1} + I_{D2}$$

$$I_{D1} \approx I_{D2}$$

I_{D2} se desequilibra ligeramente debido a I_{LM}

Convertidor en Medio Puento

Esfuerzos en los semiconductores

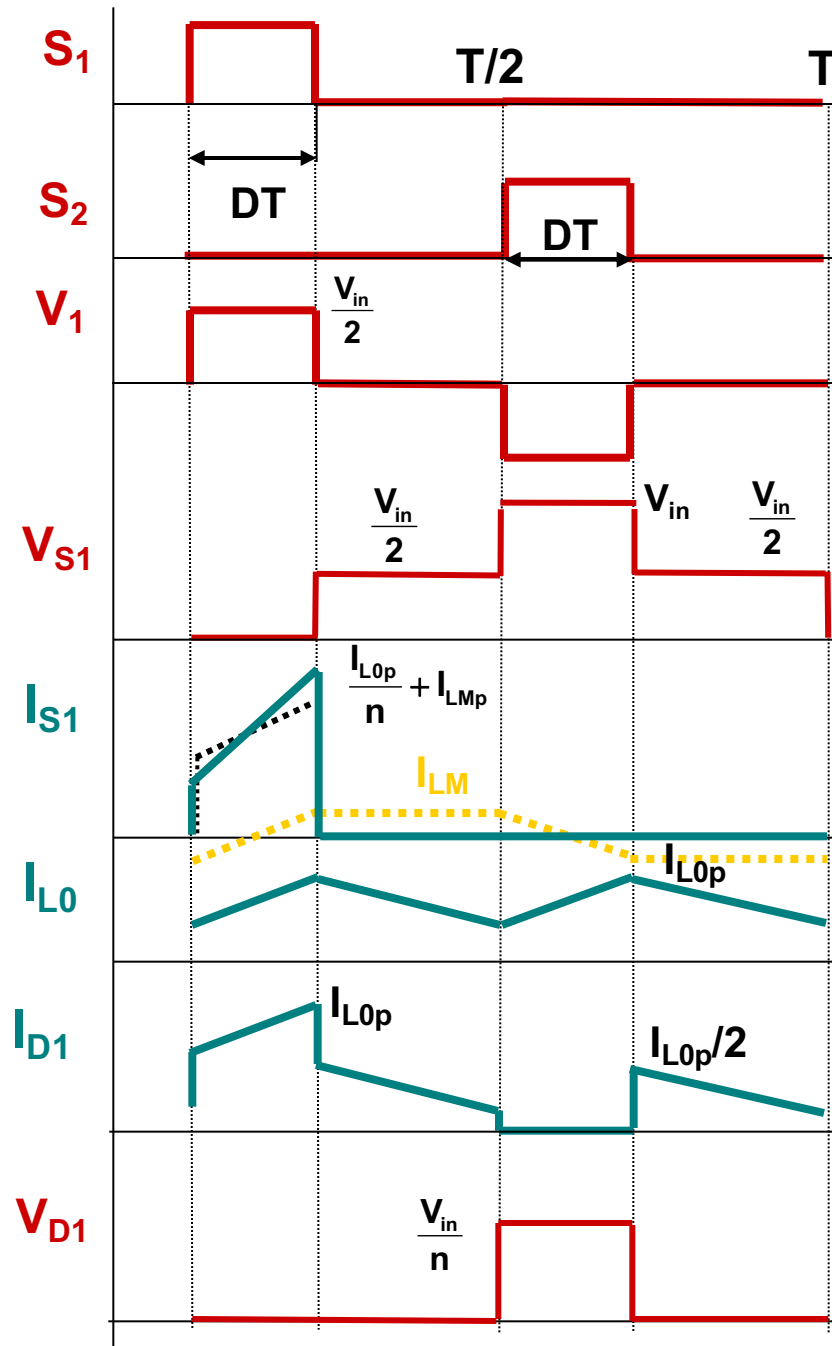


En los MOSFET

$$V_{M_MAX} = V_{in}$$

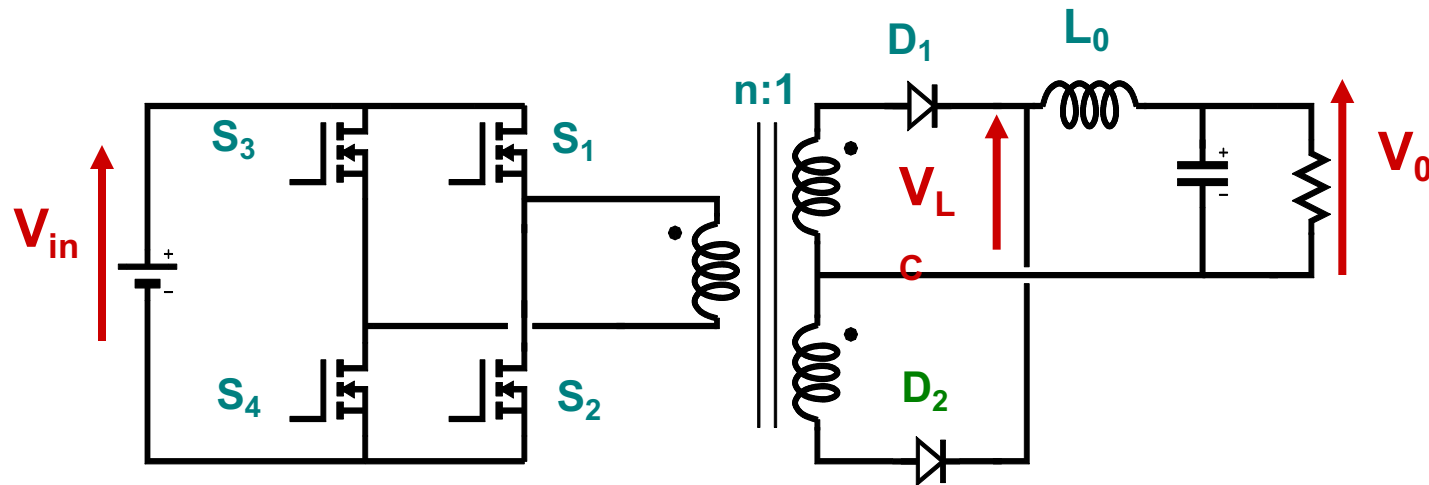
En los diodos

$$V_{D_MAX} = V_{in} / n$$

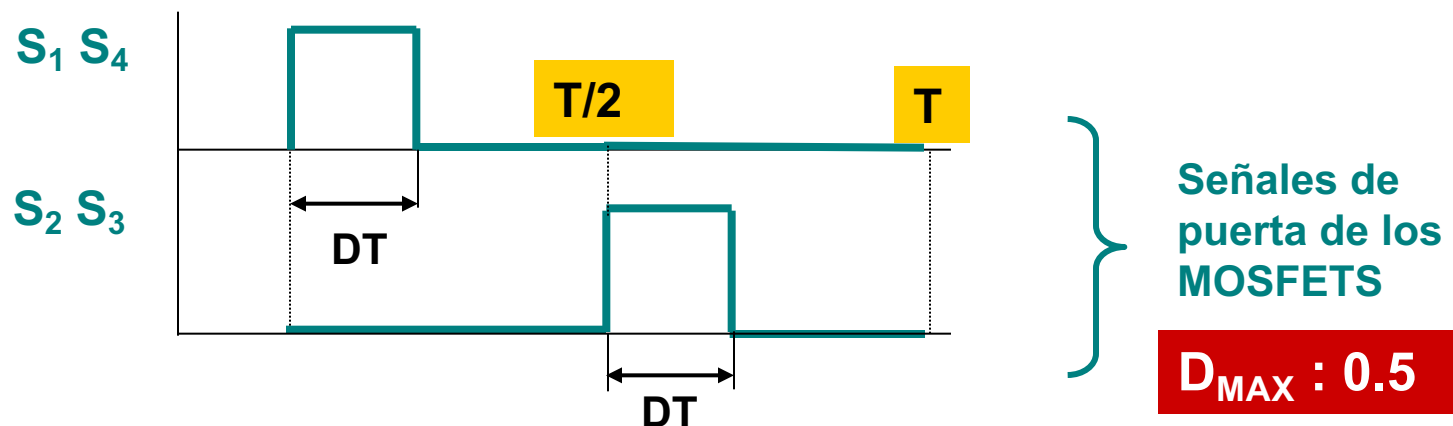


Convertidor en Puente Completo

El funcionamiento es muy similar al del convertidor en Medio Puente



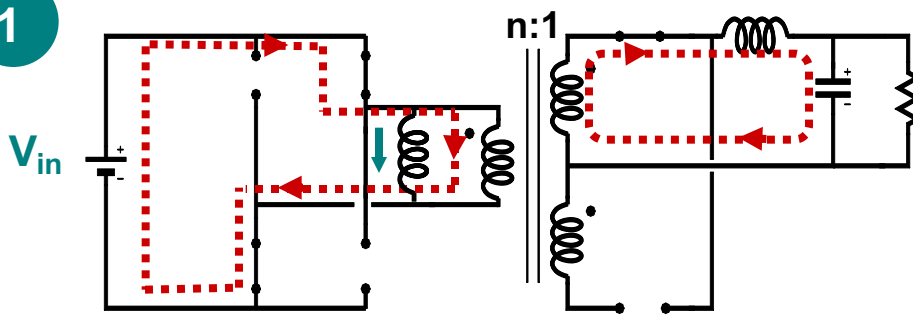
El método de control clásico consiste en encender simultáneamente S_1 y S_4 , abrirlos todos, cerrar S_2 y S_3 , abrirlos todos de nuevo y vuelta a empezar:



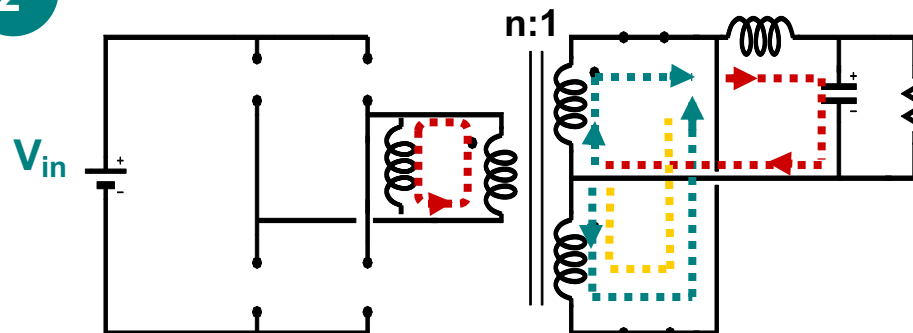
Convertidor en Puente Completo. Circulación de corrientes

Es muy similar al Medio Puente

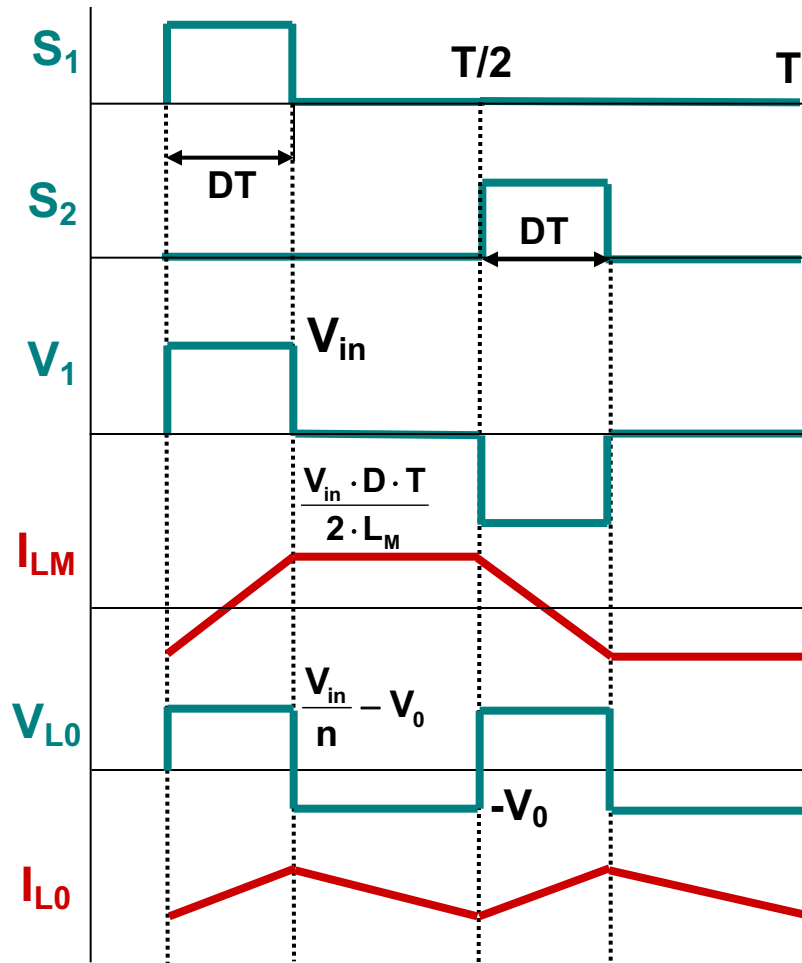
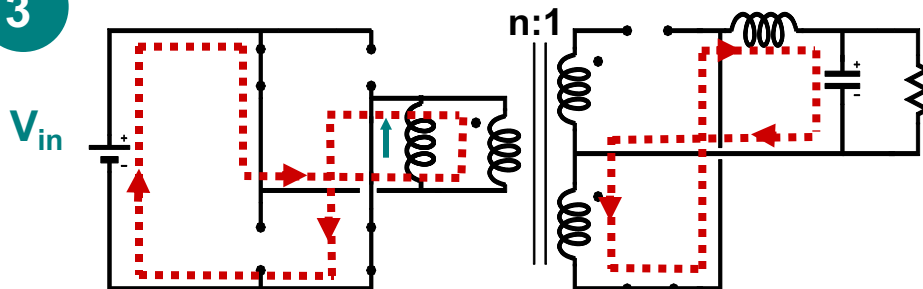
1



2



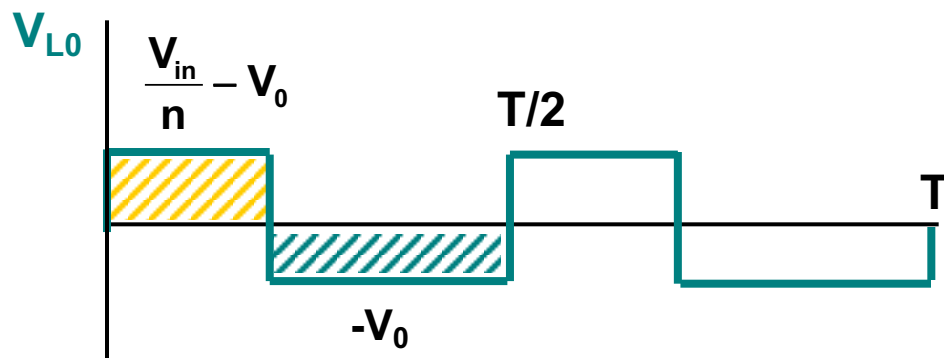
3



Tiene las mismas etapas de funcionamiento en cada ciclo

Convertidor en Puente Completo. Relación de transformación

Para calcular la relación de transformación estudiamos la forma de onda de la tensión en la bobina de salida

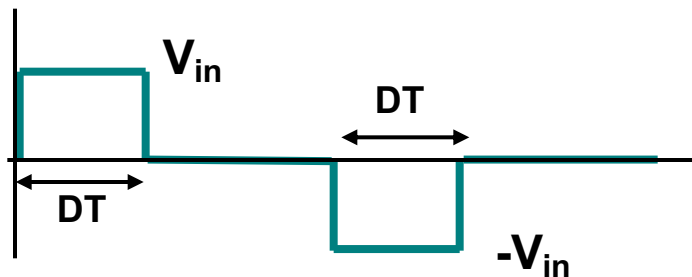


La bobina L_0 debe estar equilibrada:

$$\left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D = V_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - D \right)$$

Por tanto: $V_0 = 2 \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

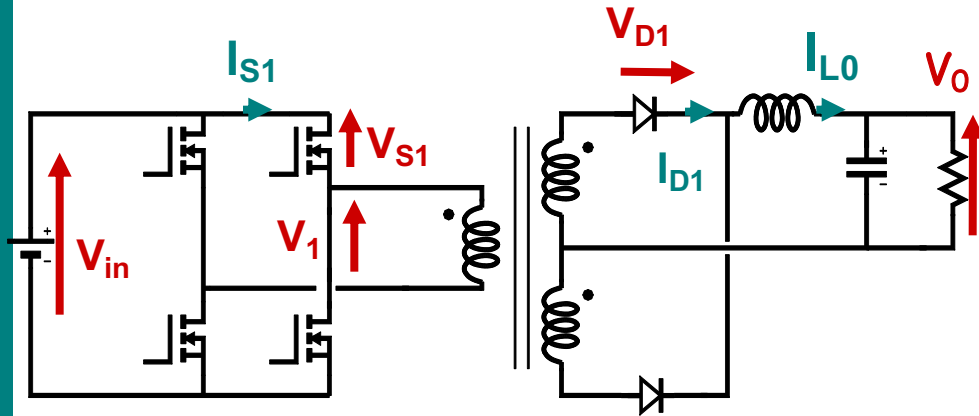
Con respecto a L_M , la forma de manejar los interruptores asegura que la forma de onda sea simétrica



i_{LM} estará equilibrada

Convertidor en Puente Completo

Esfuerzos en los semiconductores

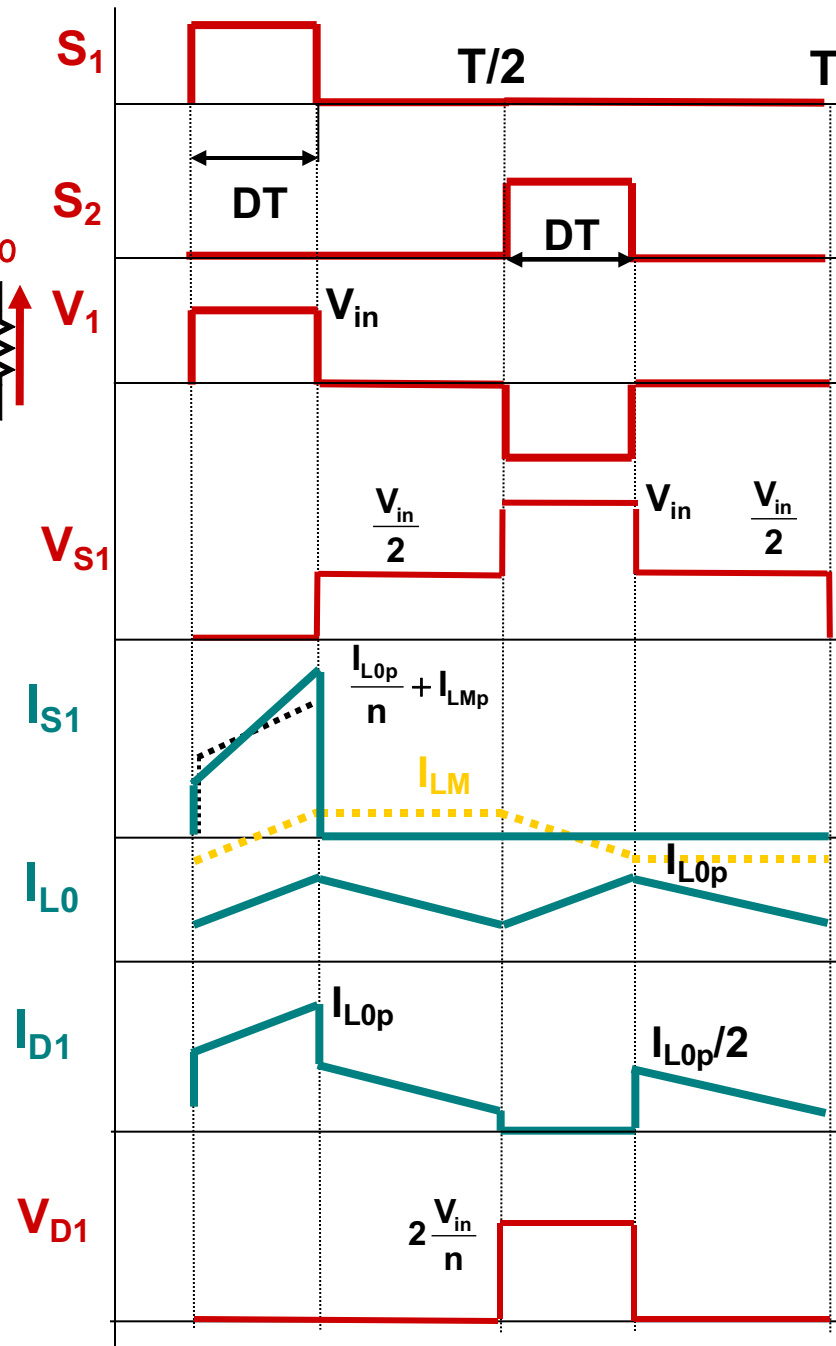


En los MOSFET

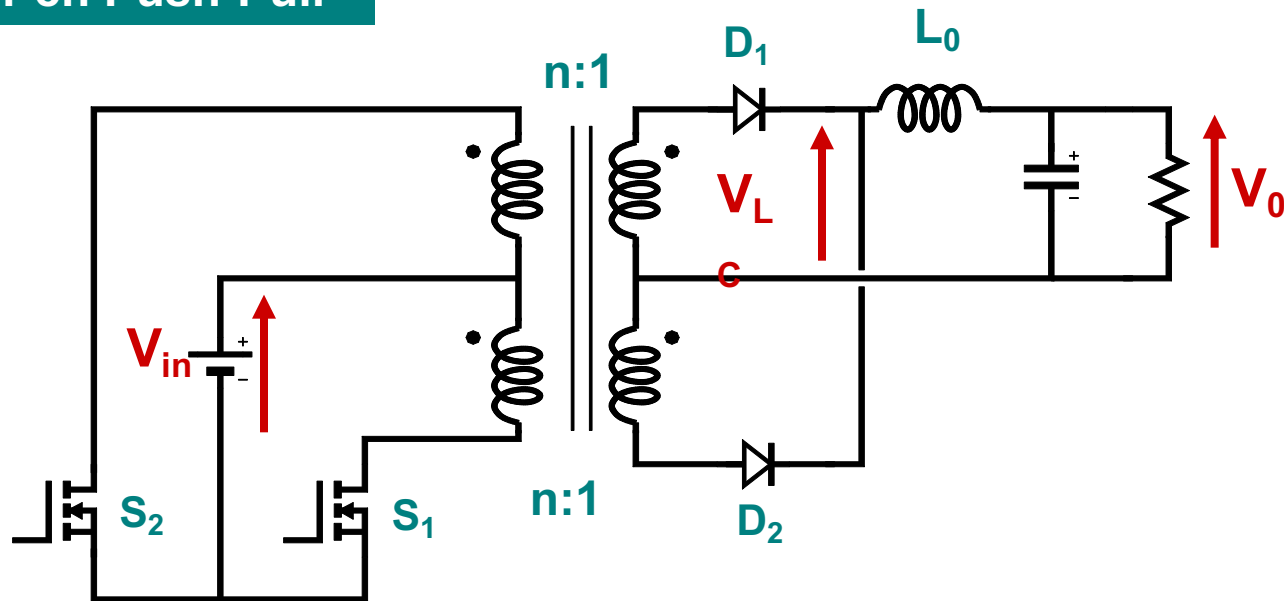
$$V_{M_MAX} = V_{in}$$

En los diodos

$$V_{D_MAX} = 2V_{in} / n$$

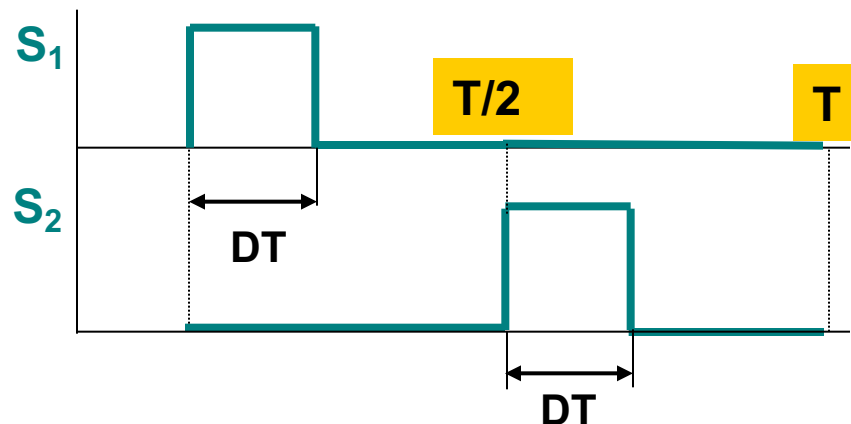


Convertidor en Push-Pull



En este caso, el primario se divide en dos partes iguales y la tensión de entrada se coloca en el punto medio. El funcionamiento es casi idéntico al del convertidor en Puente Completo.

Los dos MOSFET se manejan igual que en los casos anteriores:

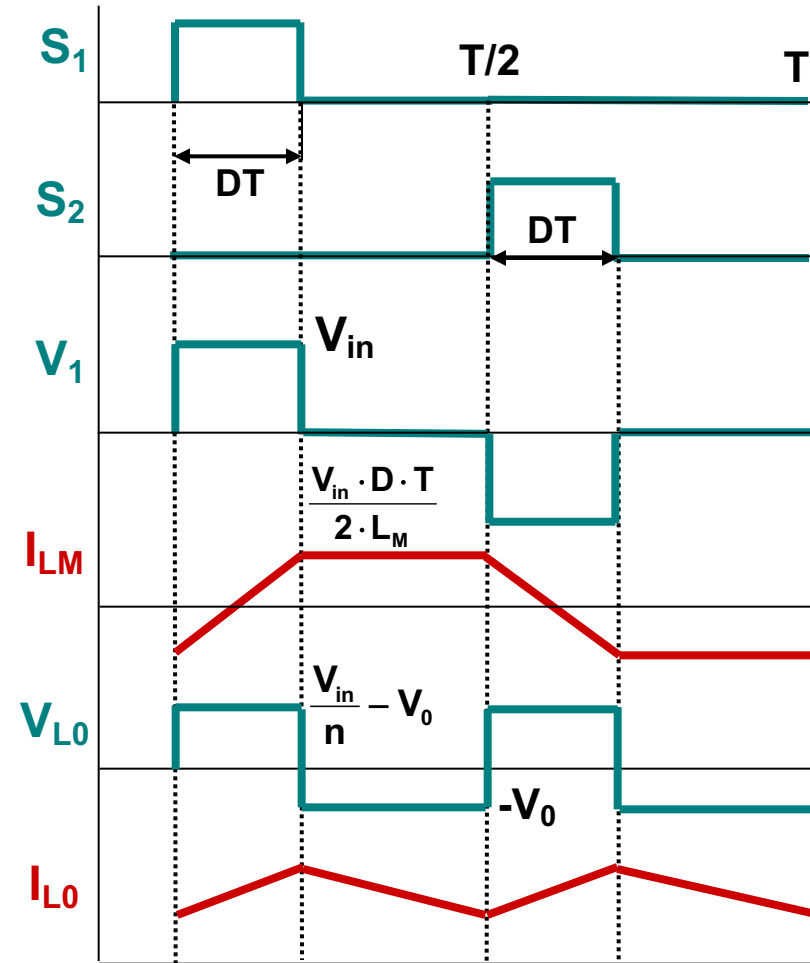
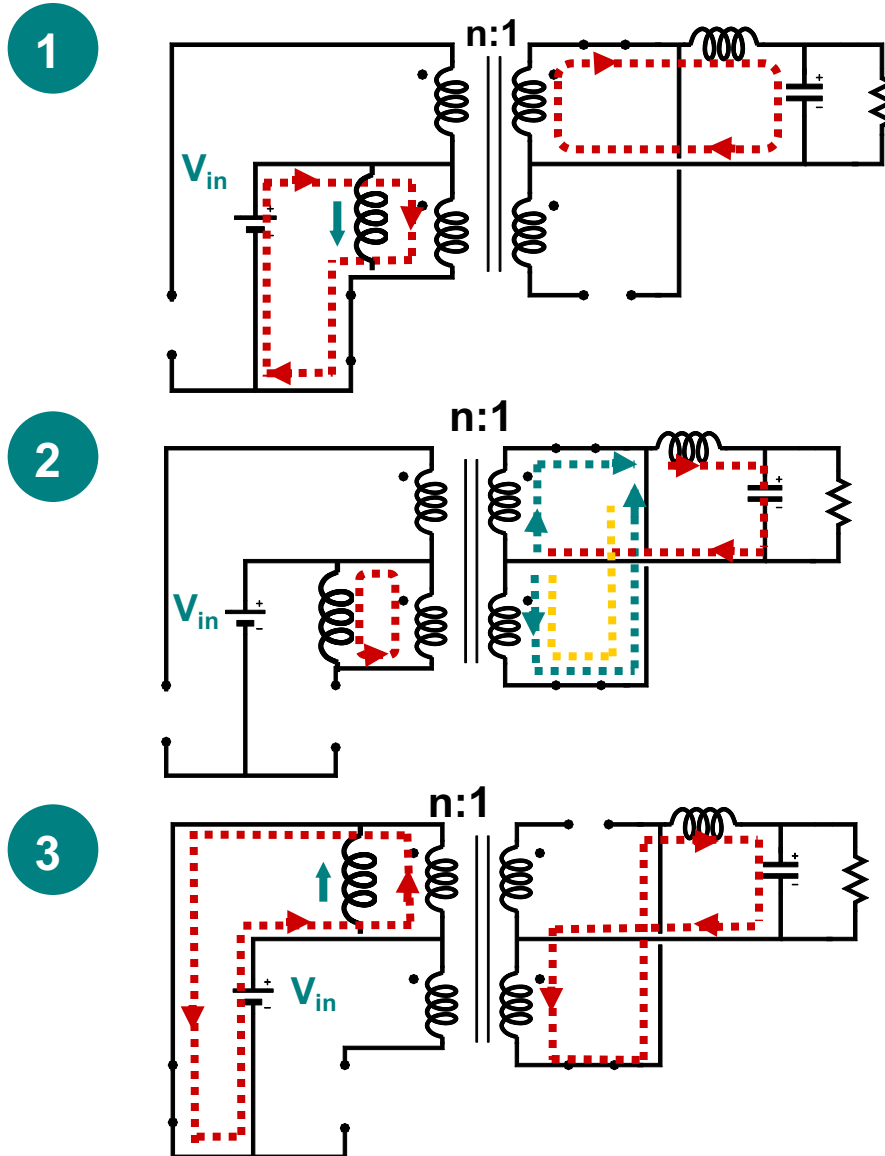


Señales de puerta de los MOSFETS

$D_{MAX} : 0.5$

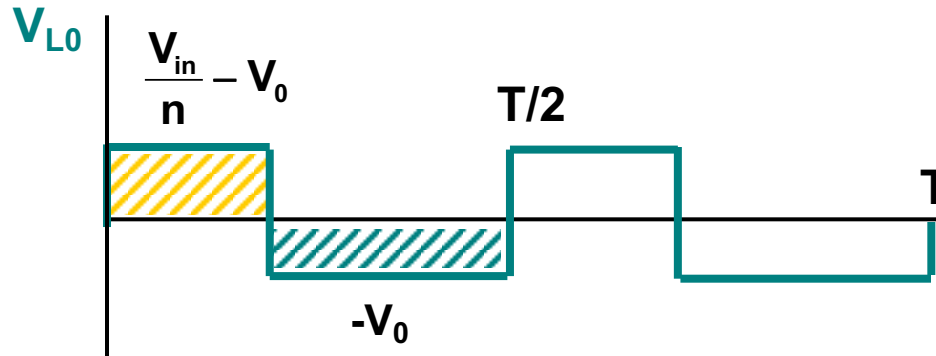
Convertidor en Push-Pull. Circulación de corrientes

Mismas formas de onda que el convertidor en Puente Completo



Convertidor en Push-Pull. Relación de transformación

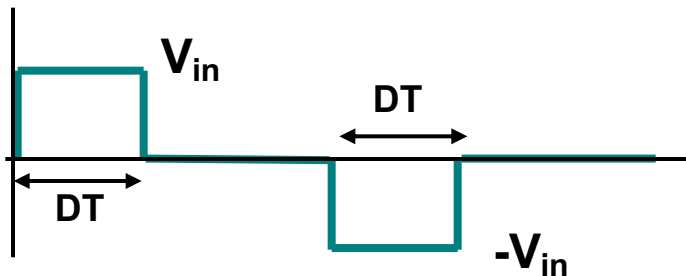
Es exactamente igual que el convertidor en Puente Completo



La bobina L_0 debe estar equilibrada: $\left(\frac{V_{in}}{n} - V_0\right) \cdot D = V_0 \cdot \left(\frac{1}{2} - D\right)$

Por tanto: $V_0 = 2 \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

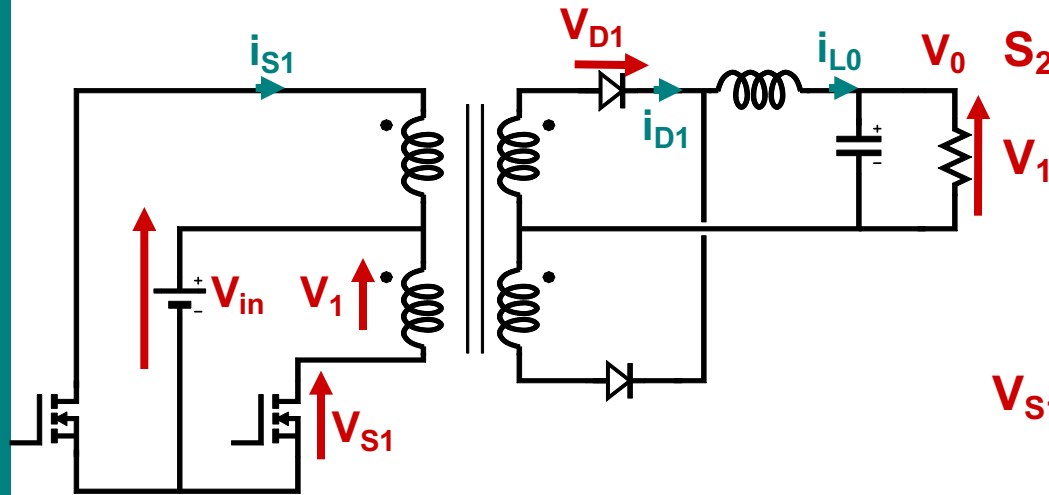
Con respecto a L_M , la forma de manejar los interruptores asegura que la forma de onda sea simétrica



i_{LM} estará equilibrada

Convertidor en Push-Pull

Esfuerzos en los semiconductores



En los MOSFET

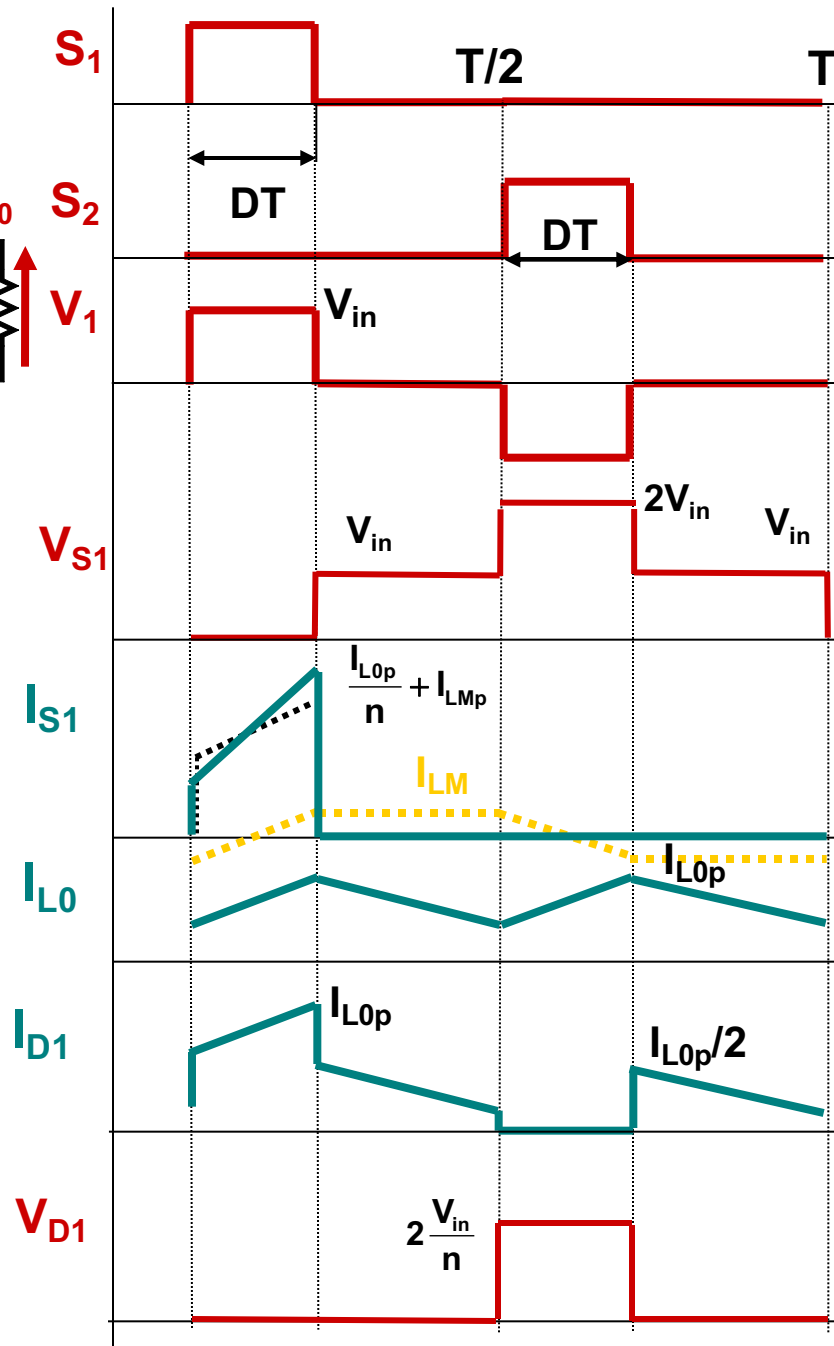
$$V_{M_MAX} = 2V_{in}$$

En los diodos

$$V_{D_MAX} = 2V_{in} / n$$

• Es el que tiene mayores esfuerzos en los semiconductores

• Los dos MOSFET referidos a masa



Límite entre MCC y MCD

La operación en MCD es similar al convertidor Reductor y al Forward. Por otra parte, en los tres convertidores simétricos el funcionamiento es prácticamente idéntico.

La corriente de pico es:

$$I_{Lp0} = \frac{1}{L_0} \cdot \left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D \cdot T$$

El valor medio de la corriente I_L es la corriente de salida:

$$I_0 = \bar{I}_{L0} = \frac{1}{2} I_{Lp0} = \frac{1}{2L_0} \cdot \left(\frac{V_{in}}{n} - V_0 \right) \cdot D \cdot T$$

Se cumple: $V_0 = 2 \cdot \frac{V_{in}}{n} \cdot D$

Puente Completo y Push-Pull

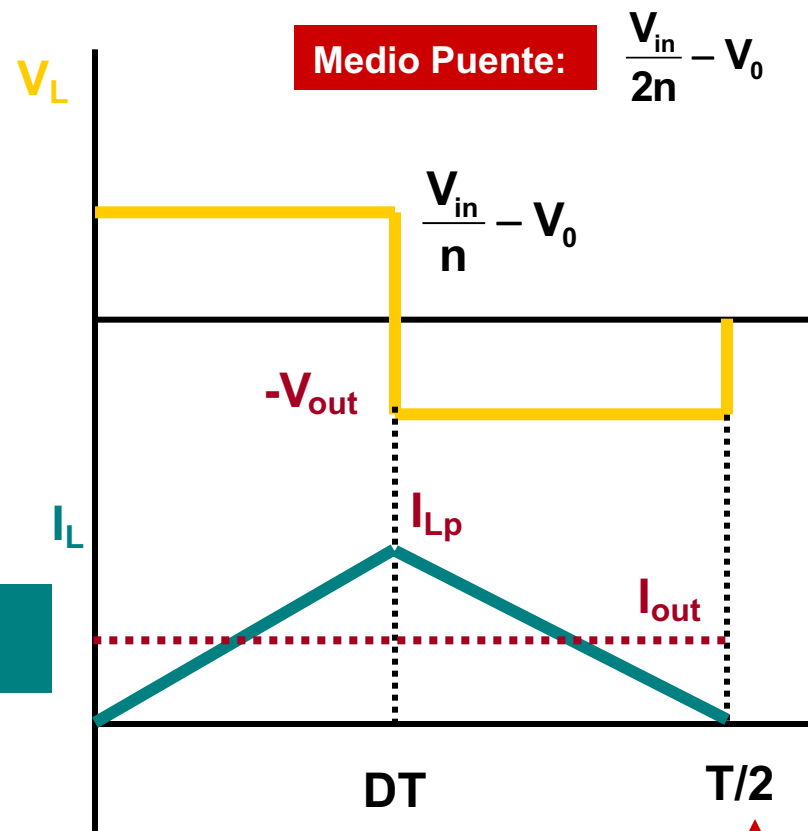
$$V_0 = \frac{V_{in}}{n} \cdot D$$

Medio Puente

Por tanto:

$$L_{LIM} = \frac{V_0 \cdot T}{2 \cdot I_0} \cdot \left(\frac{1}{2} - D \right)$$

Válido para los tres



Atención: T/2

Cálculo de la relación de transformación

El funcionamiento en MCD es muy similar en los tres casos.

(En el caso del Medio Puente hay un coeficiente distinto: en vez de n , $2n$)

En MCD se cumple:

Tensión media en L nula:

$$\left(\frac{V_{in}}{n} - V_{out} \right) \cdot D = V_{out} \cdot \Delta_2$$

La corriente de pico es:

$$I_{Lp0} = \frac{1}{L_0} \cdot V_0 \cdot \Delta_2 \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_0 = I_{Lp0} (D + \Delta_2)$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R_L}$$

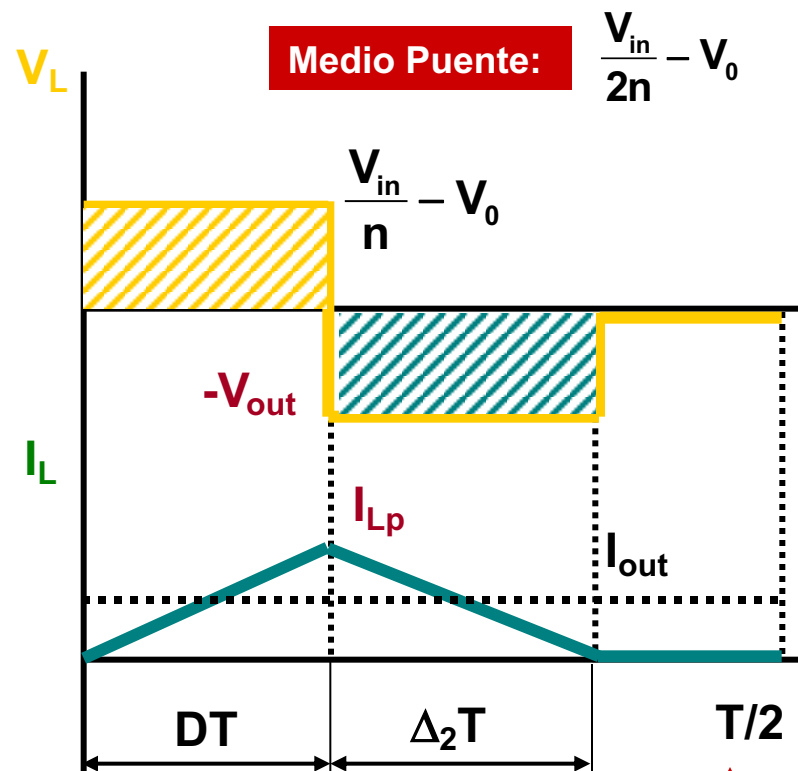
R_L es la carga de salida

$$D = \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}} \sqrt{\frac{L_0}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_0 \cdot n}{V_{in}}}}$$

$$D = \frac{V_0 \cdot 2n}{V_{in}} \sqrt{\frac{L_0}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_0 \cdot 2n}{V_{in}}}}$$

Puente Completo y Push-Pull

Medio Puente



Atención: $T/2$

Operación en MCD

$$D = \frac{V_o \cdot 2n}{V_{in}} \sqrt{\frac{L_o}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_o \cdot 2n}{V_{in}}}}$$

El comportamiento es similar al del convertidor Reductor y al del Forward

El ciclo de trabajo depende de la carga

El valor de L también influye en el ciclo de trabajo

Ejemplo

$$V_{out} = 5 \text{ V}$$

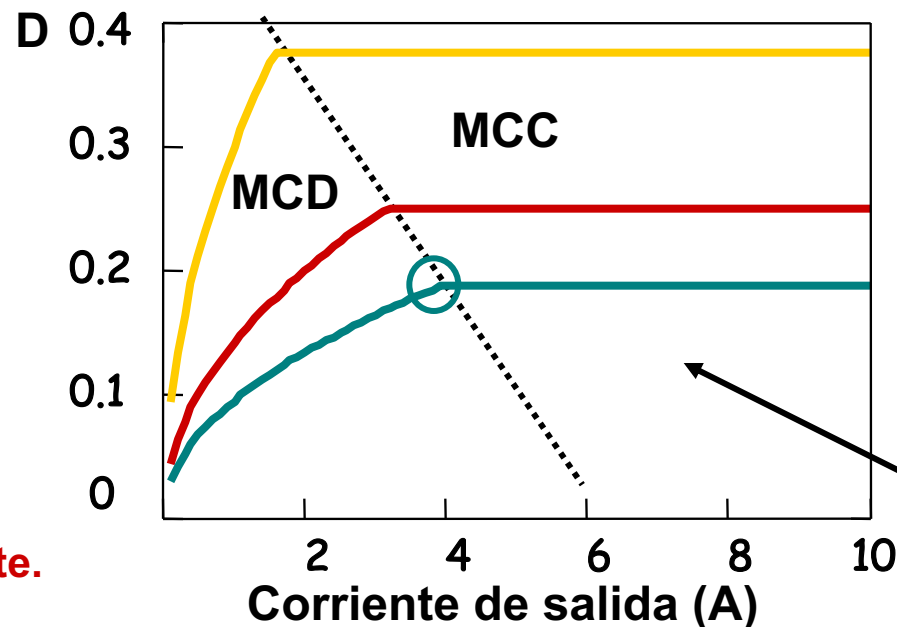
$$L = 2 \text{ } \mu\text{H}$$

$$f = 100 \text{ kHz}$$

$$n = 15$$

Ejemplo: Medio Puente.

Influencia de R_L



$$V_{in} = 200 \text{ V}$$

$$V_{in} = 300 \text{ V}$$

$$V_{in} = 400 \text{ V}$$

Peor caso:
 V_{inmax}

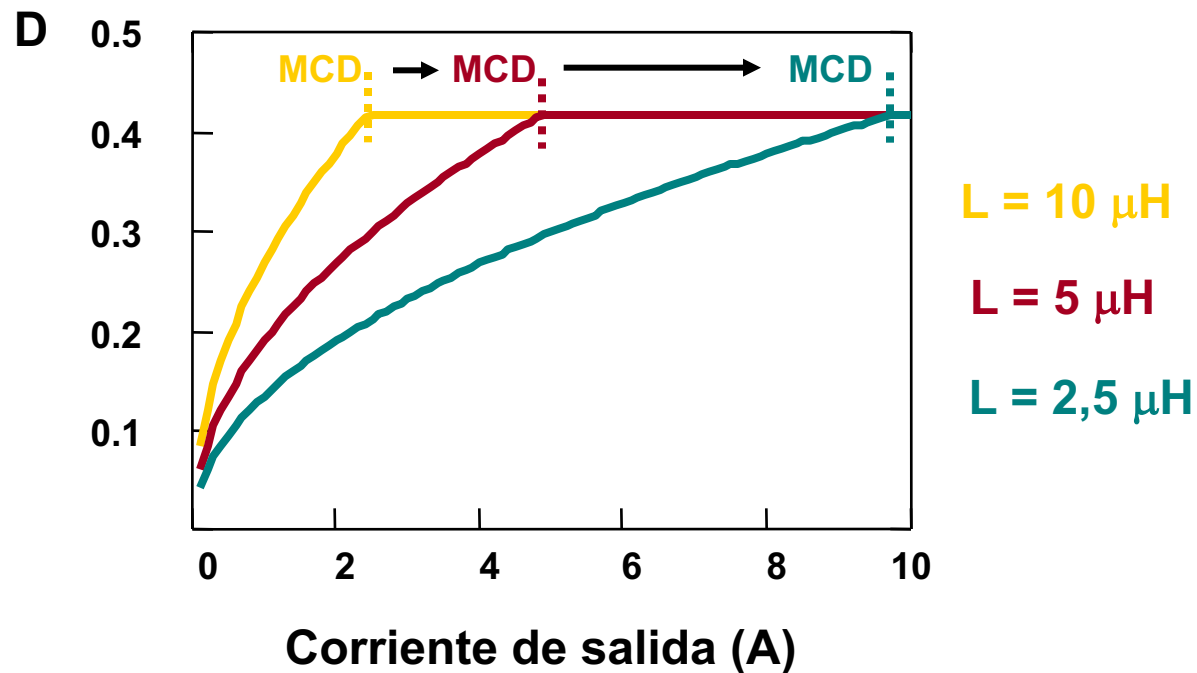
Operación en MCD

El valor de L influye en el ciclo de trabajo

Ejemplo

$$V_{in} = 300 \text{ V}$$

$$V_{out} = 5 \text{ V}$$



Cuanto más grande es la bobina, el convertidor trabaja en MCC hasta cargas más bajas.

Cálculo del condensador

En todos los casos se calcula de forma similar

El rizado pico-pico en el condensador será:

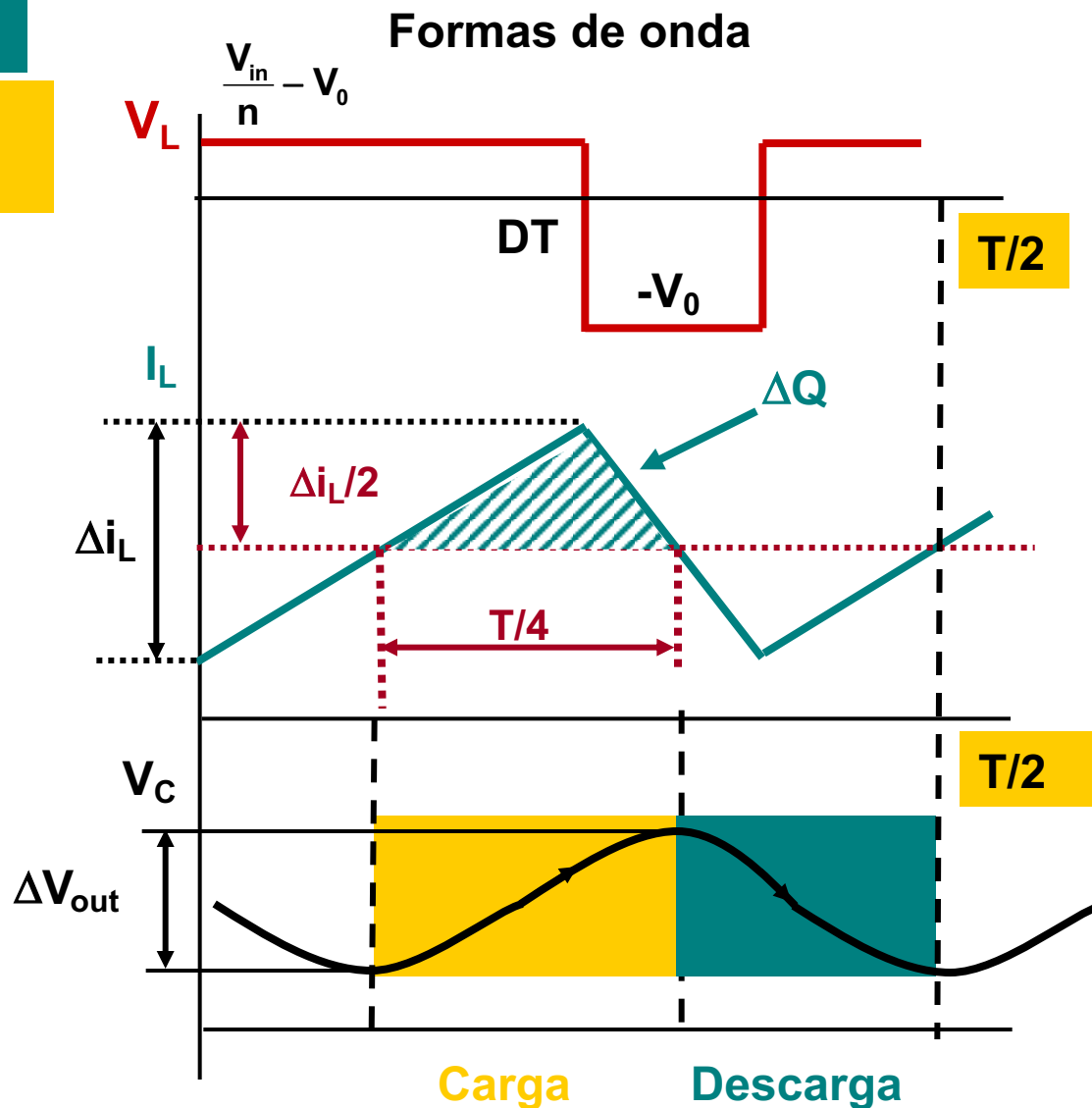
$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_{L0}}{2} \cdot \frac{T}{4}$$

Durante (1-D):

$$\Delta I_{L0} = \frac{V_0}{L_0} \cdot \left(\frac{1}{2} - D \right) \cdot T$$

Por tanto:

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 \cdot T^2}{16 \cdot L_0 \cdot C} \cdot \left(\frac{1}{2} - D \right)$$



Conocido el valor de L y tomando como dato ΔV_{out} podemos calcular C

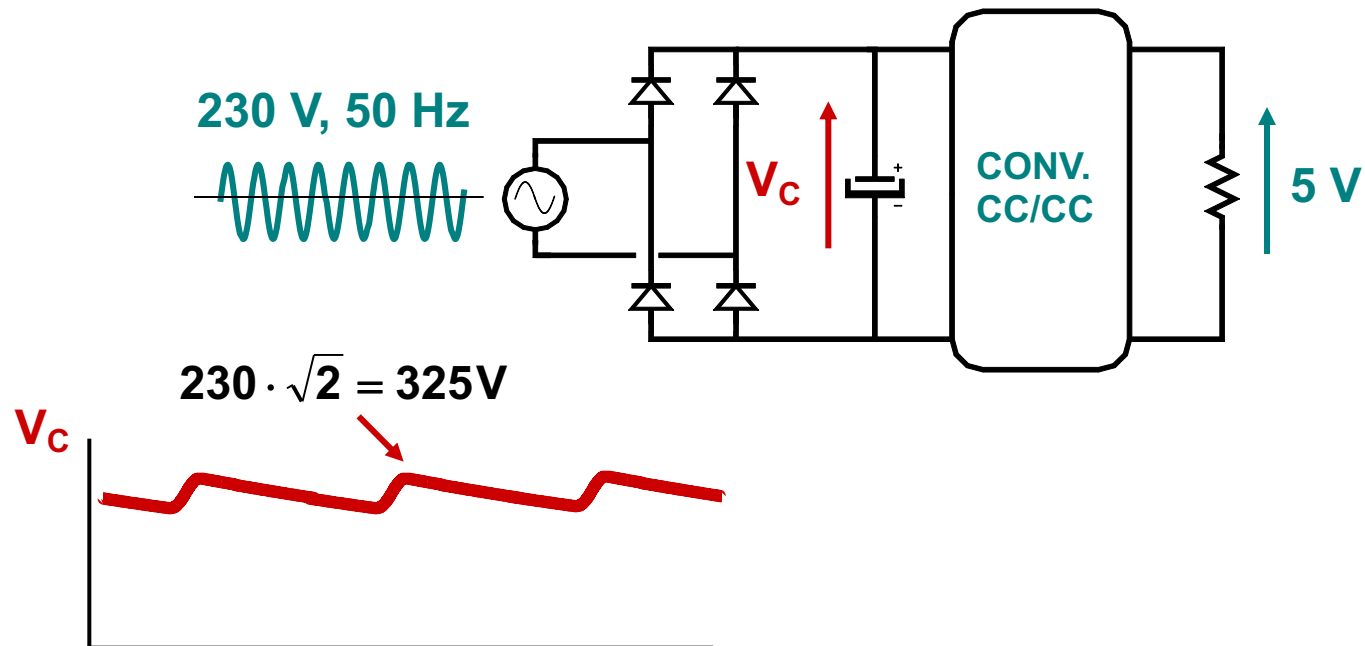
Comparación de topologías

Vamos a comparar las 5 topologías vistas suponiendo que van a ser utilizadas para la misma aplicación.

Especificaciones:

- Tensión de entrada: 230 V
- Tensión de salida: 5 V
- Potencia máxima: 200 W
- Límite MCD: 50 W
- ΔV_0 : 2% V_0 (pico-pico)

La etapa de entrada será un rectificador y un filtro por condensador:



Componentes:					
	Nº de Diodos	Nº de MOSFET	MOSFET no ref. a masa	Nº de Comp. Magnéticos	Potencia Típica Máxima.
Flyback	1	1	0	1	300 W
Forward	1	1	0	2	500 W
Medio Puente	2	2	1	2	2 kW
Push-Pull	2	2	0	2	2 kW
Puente Completo	2	4	2	2	> 2 kW

El Flyback tiene menor nº de componentes. Se suele usar para potencias más bajas.

Los puentes manejan potencias más elevadas. En general, cuanto mayor es el nº de transistores, más potencia se puede manejar.

El Puente Completo se utiliza para potencias más elevadas.

De todas formas, cada caso debe analizarse por separado. Nada es generalizable. Hay Flybacks de más de 1 kW. Razón: menor coste.

Componentes pasivos:

- Límite MCD: 50 W D: 0.4
- ΔV_0 : 2% V_0 (pico-pico)

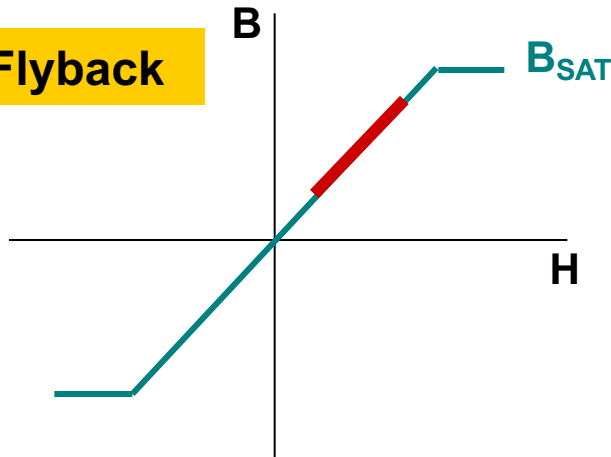
	Flyback	Forward	Medio Puente	Push-Pull	Puente Completo
n	43.3	26	26	52	52
L_M	1.7 mH				
L₀	1.5 μ H	0.25 μ H	0.25 μ H	0.25 μ H
C	1.6 mF	250 μ F	125 μ F	125 μ F	125 μ F

Esfuerzos en los semiconductores

	Flyback	Forward	Medio Puente	Push-Pull	Puente Completo
V_M	540 V	650 V	325 V	650 V	325 V
I_M	1.6 A	1.6 A	1.6 A	0.8 A	0.8 A
V_D	12.5 V	12.5 V	12.5 V	12.5 V	12.5 V
I_D	66.6 A	40 A	40 A	40 A	40 A

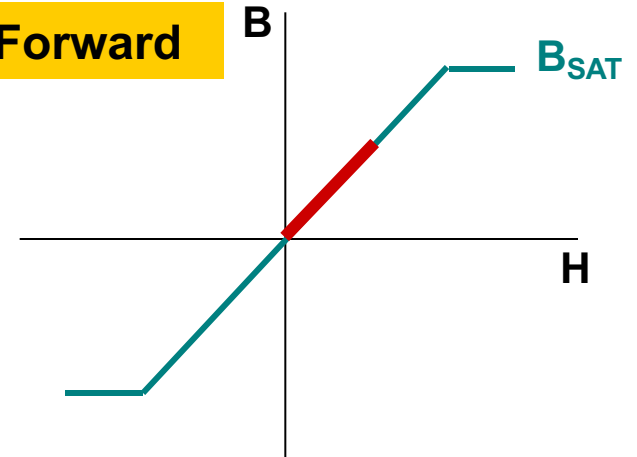
Aprovechamiento del núcleo magnético

Flyback



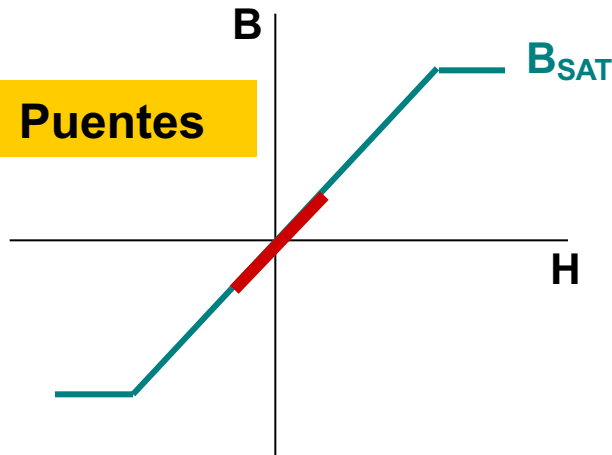
La corriente del primario es también la magnetizante.

Forward



La corriente magnetizante es siempre positiva

Puentes



La corriente magnetizante está centrada

Para una misma variación de corriente, los puentes trabajan con B más bajas. Por tanto, tendrán menos pérdidas y aprovecharán mejor el núcleo.

El Flyback es el que peor lo aprovecha.