



Universidad  
de Oviedo

## **Lección11**

# **Convertidores CC/CC**

## **1ª Parte: Convertidores sin Aislamiento**

**Sistemas Electrónicos de Alimentación**

**5º Curso. Ingeniería de Telecomunicación**

## Índice

- Introducción
- Fuentes Lineales

### Convertidores sin aislamiento galvánico

- Convertidor Reductor (*Buck*)
- Convertidor Elevador (*Boost*)
- Convertidor Reductor-Elevador (*Buck-Boost*)

### Convertidores con aislamiento galvánico

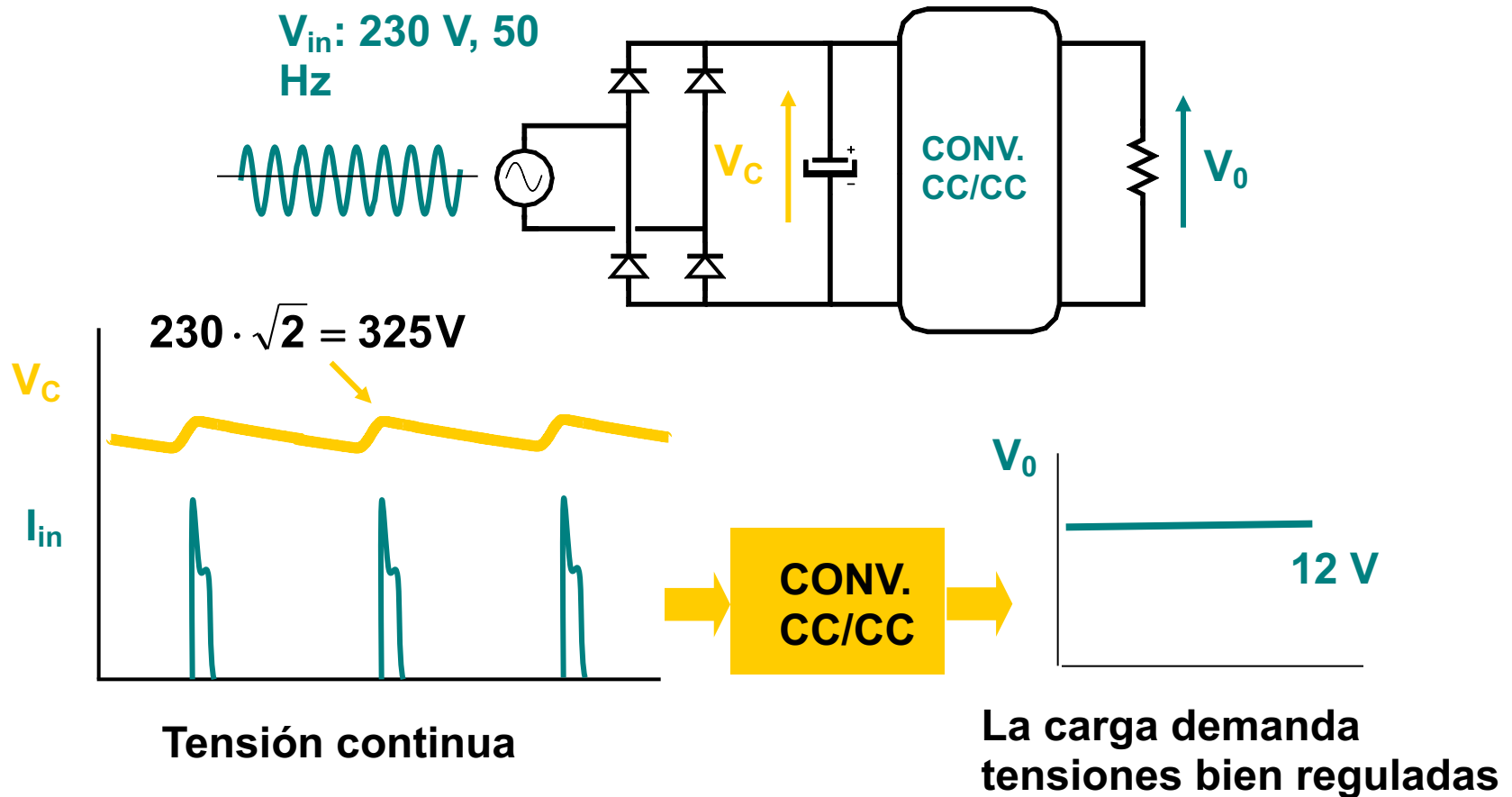
- Convertidor Flyback
- Convertidor Forward
- Convertidor en Medio Puente
- Convertidor en Puente Completo
- Convertidor en Push-Pull

## Conversión CC/CC

En general, a pesar de disponer de una tensión continua, es necesario transformarla para poder ser utilizada por la carga

## Ejemplos

## Rectificador no controlado convencional



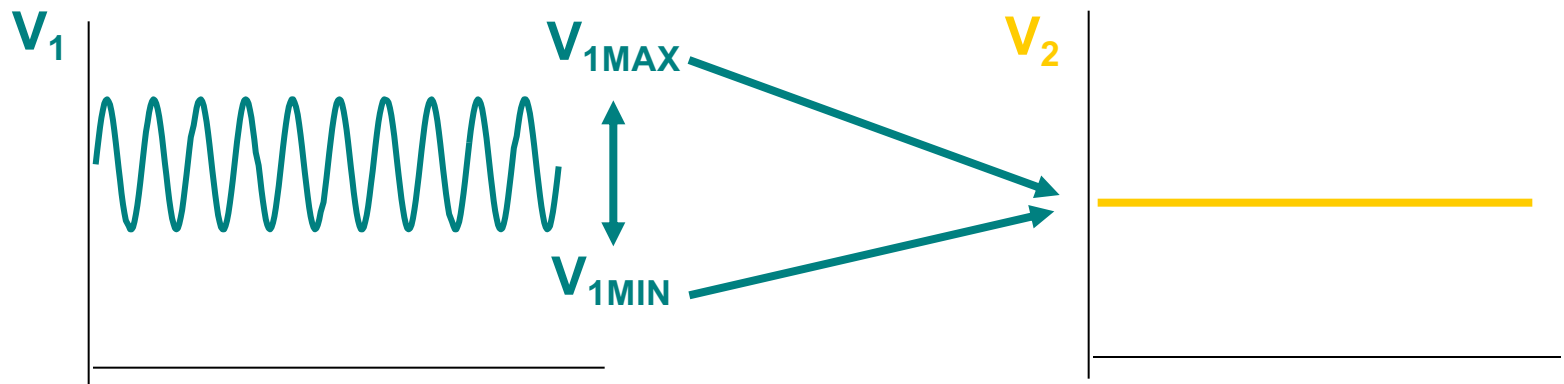
## Conversión CC/CC

Los convertidores CC/CC son equipos electrónicos cuyo propósito es convertir una tensión continua en otra tensión continua pero de distinto valor.



En general,  $V_1$  no va a ser perfectamente constante

El convertidor debe funcionar dentro de un rango de tensión de entrada



## Conversión CC/CC

Todos los equipos electrónicos funcionan con una tensión continua

En general, todos los equipos necesitan un convertidor CC/CC para alimentar su circuitería a la tensión adecuada

Cada aplicación demanda la energía de una forma determinada

### Ejemplos:

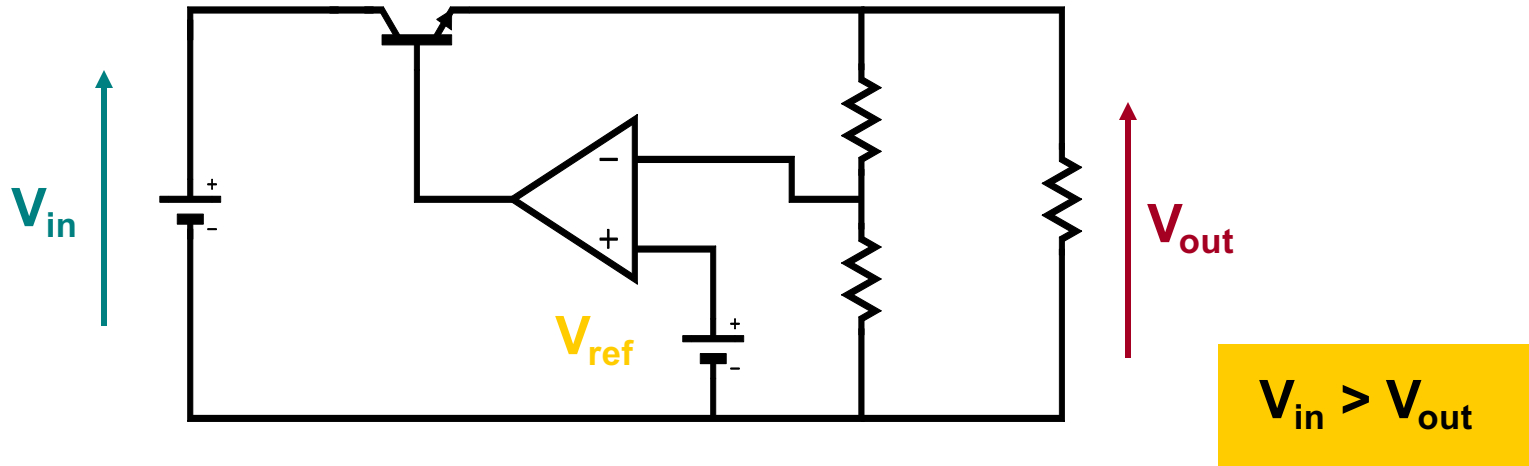
- Telecomunicaciones: 48 V
- Microprocesadores: 3.3 V, 1.5 V...
- Equipos para automóviles (Radio, CD, etc): 12 V, 42 V.
- Equipos de audio:  $\pm 70$  V
- Circuitos digitales en general: 5 V, 12 V

Además, se suele especificar una tolerancia máxima de variación para la tensión de salida

P. ej: 12 V  $\pm$  5%

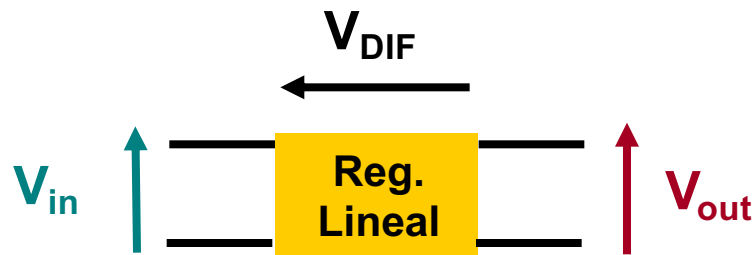
## Reguladores Lineales

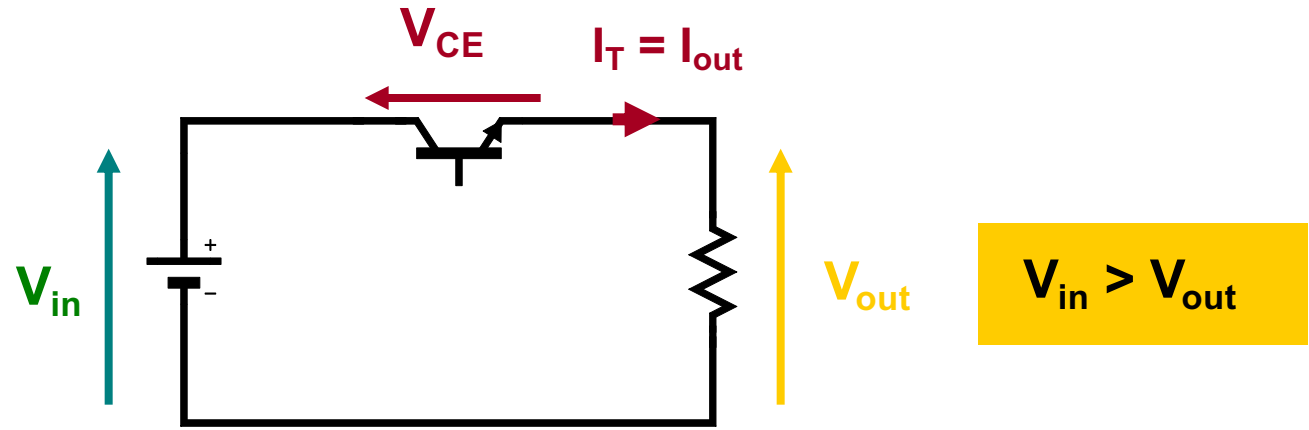
La forma más sencilla de convertir una tensión continua en otra de distinto valor es mediante el uso de un regulador lineal



Idea Básica

Restarle a la tensión de entrada la tensión necesaria para obtener a la salida el valor deseado.





**Problema:** pérdidas en el transistor muy elevadas

$$P_T = V_{CE} \cdot I_{out}$$

**Mal rendimiento:**

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{out} \cdot I_{out} + V_{CE} \cdot I_{out}} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Por tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre  $V_{in}$  y  $V_{out}$ , peor rendimiento

Ejemplo:  $\begin{cases} V_{in} : 12 \text{ V} \\ V_{out} : 5 \text{ V} \end{cases} \rightarrow \eta = 41.6\%$

Para polarizar el transistor necesitamos al menos  $V_{CE} > 2 \text{ V}$

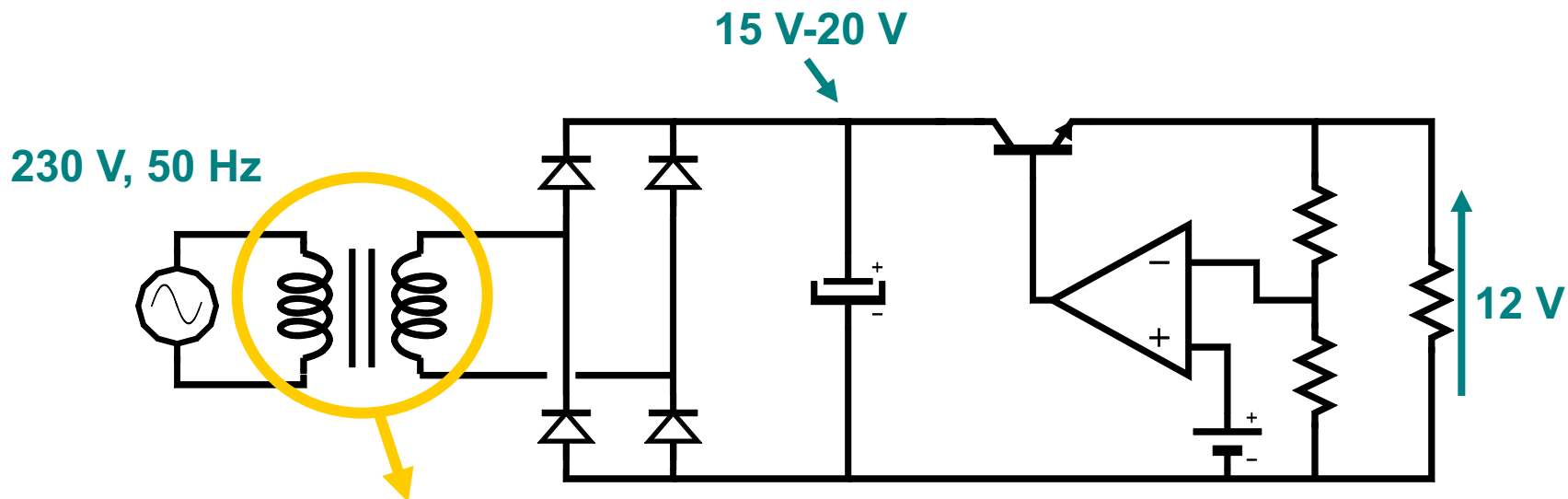
## Reguladores Lineales

La fuente de energía más habitual es la red eléctrica

Los valores de tensión son muy distintos a los que usan los circuitos

El rendimiento sería pésimo

Es necesario adaptar el nivel de tensión con un transformador de 50 Hz



**Transformador de 50 Hz: MUY VOLUMINOSO**

Reguladores  
Lineales

Baratos, Sencillos, Robustos, Sin EMI

Voluminosos, pesados, mal rendimiento

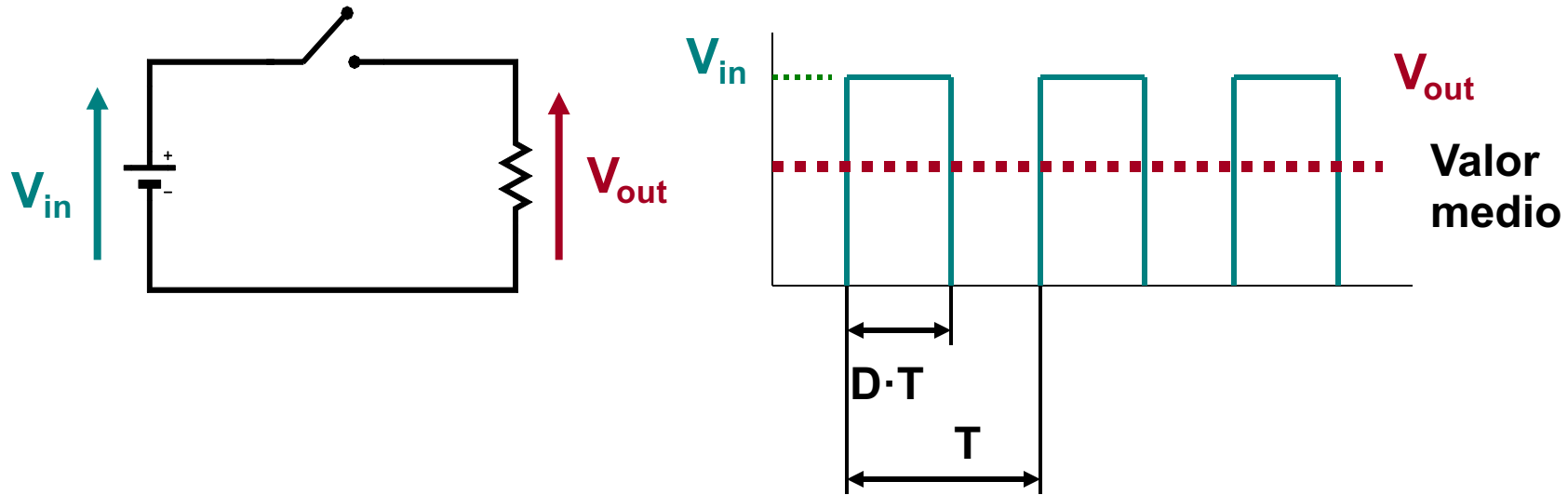


El Convertidor Reductor (*Buck*)

Se pretende conseguir el mismo resultado de una forma no disipativa

Idea básica

Trocear la tensión continua



Ciclo de trabajo (D):  
*Duty Cycle*

Fracción de tiempo respecto del periodo que un interruptor está en conducción

Valor medio de la tensión de salida:  $V_{OUT} = V_{in} \cdot D$

Actuando sobre D podemos elegir el valor de  $V_{OUT}$

El interruptor se supone ideal

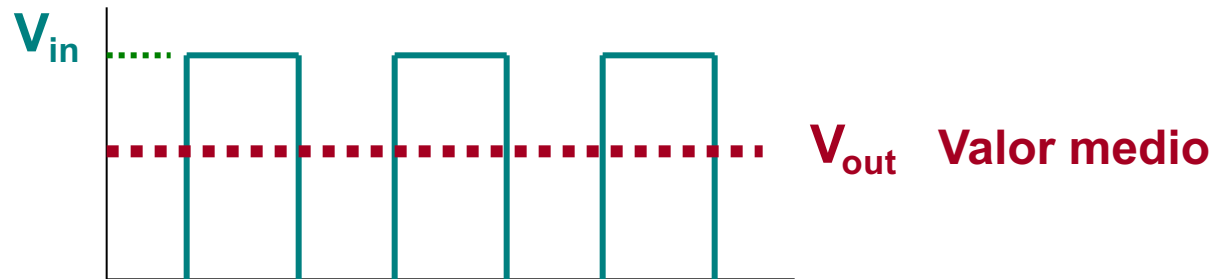
En conducción, la caída de tensión es nula

En corte, no hay circulación de corriente

En ningún momento conviven tensión y corriente en el dispositivo

No hay disipación de energía en ningún componente

El rendimiento es del 100 %

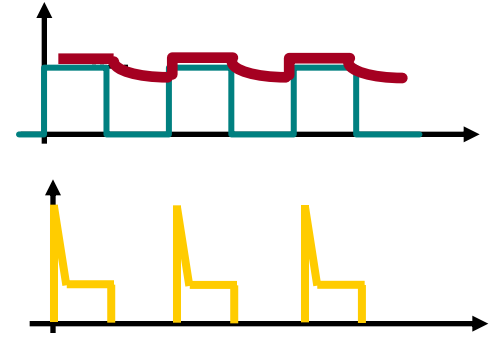
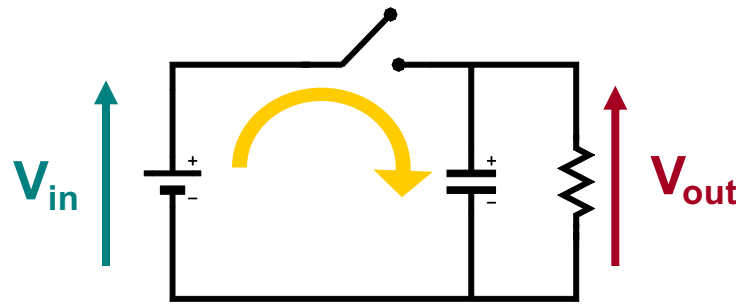


Tensión continua con un valor medio controlable

El rizado de la forma de onda es muy grande

Debemos reducir el contenido armónico de esta forma de onda

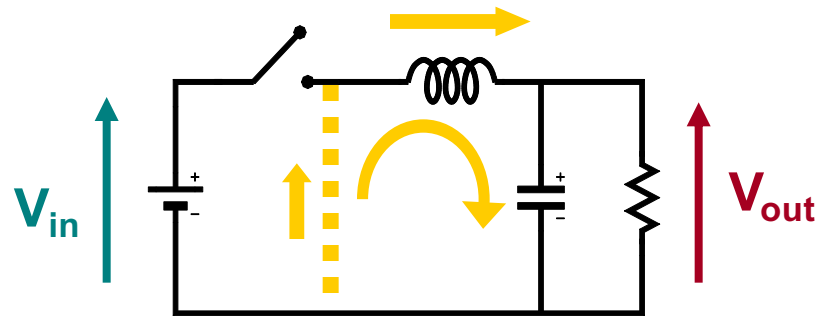
## Primera opción de filtro: un condensador



No es válida

El condensador no puede cargarse bruscamente  
Debemos colocar una impedancia intermedia

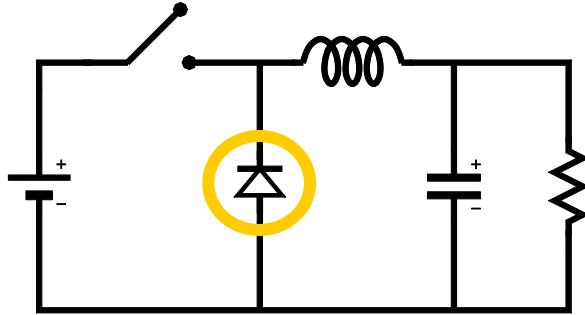
## Filtro LC



No es válida

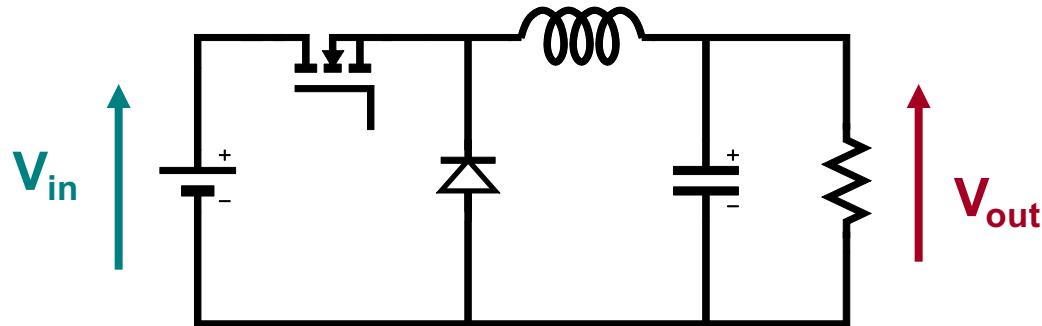
La bobina no tiene por donde descargarse.  
Debemos añadir un camino alternativo de descarga.

Se coloca un diodo para permitir que la corriente que circula por la bobina tenga un camino para seguir circulando



Este diodo se llama:  
“diodo de libre circulación”

Con esto tenemos el convertidor reductor básico:



El MOSFET en conducción y en corte hará las veces de interruptor.

Habrà también un circuito de control cuya función será precisamente abrir y cerrar el interruptor.

## Relación de transformación en MCC

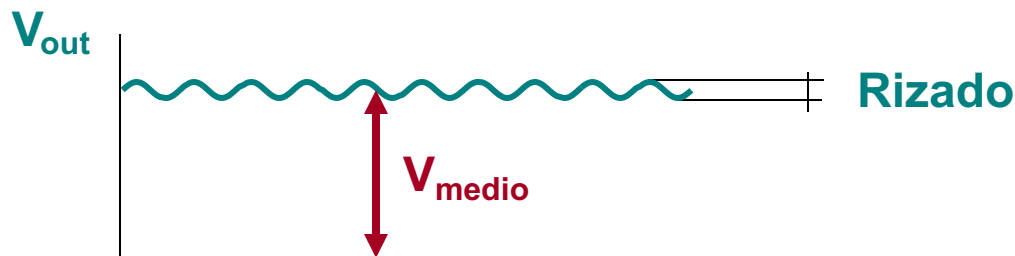
Es la relación entre la tensión de salida y la tensión de entrada:

$$M = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$$

Supuestos:

1. Semiconductores ideales
2. L y C sin pérdidas
3. Fuente de entrada sin impedancia de salida
4. Rizado de la tensión de salida despreciable

Rizado: componente de alterna de una forma de onda



En los convertidores CC/CC siempre hay un pequeño rizado en la tensión de salida  
Vamos a suponer que es despreciable

En general, los convertidores pueden operar de 2 modos distintos:

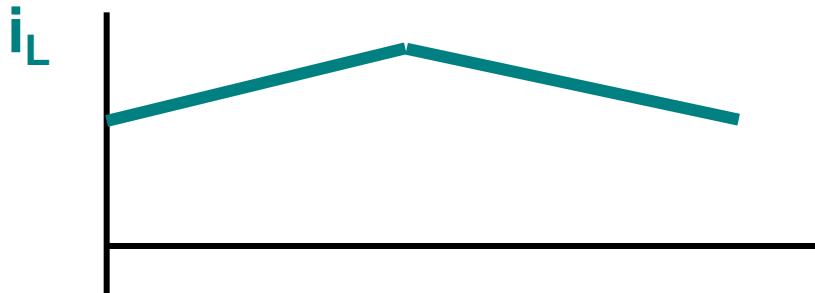
1. Modo de Conducción Continuo (MCC)
2. Modo de Conducción Discontinuo (MCD)

Depende de cómo sea la corriente que circula por la bobina:

Hay circulación de corriente durante todo el periodo



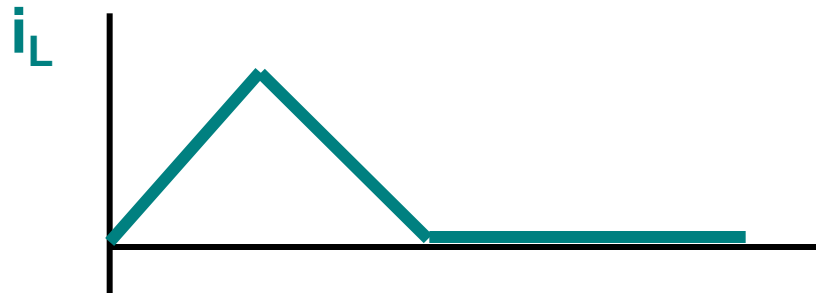
MCC



La corriente se hace cero en algún instante



MCD

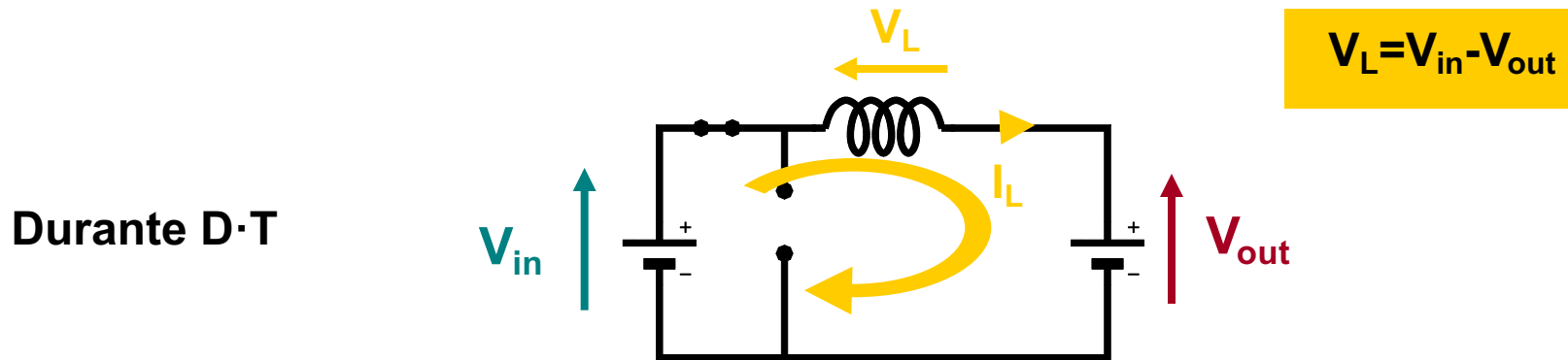


## Relación de transformación en MCC

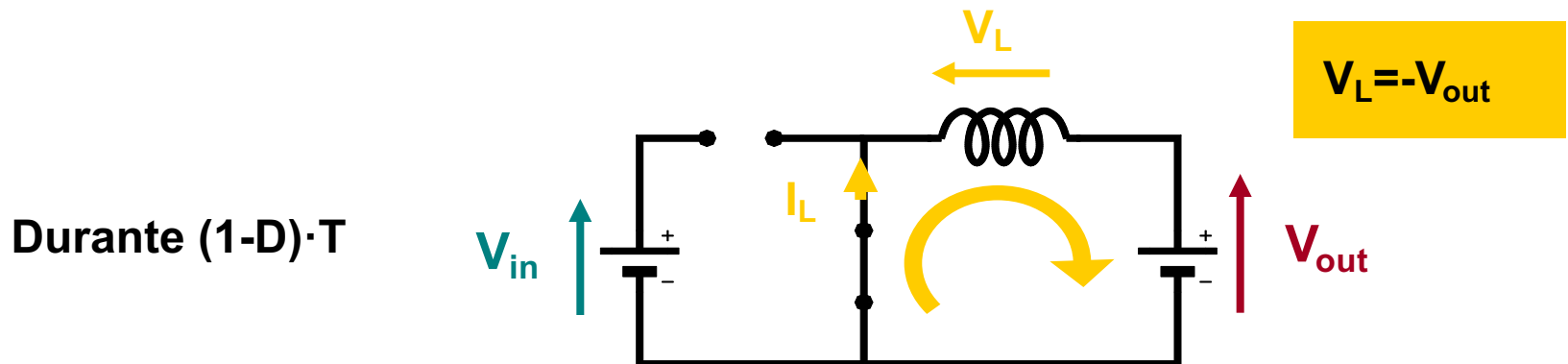
Para obtenerla estudiamos la forma de onda de la tensión en la bobina

En MCC el circuito pasa por 2 estados distintos:

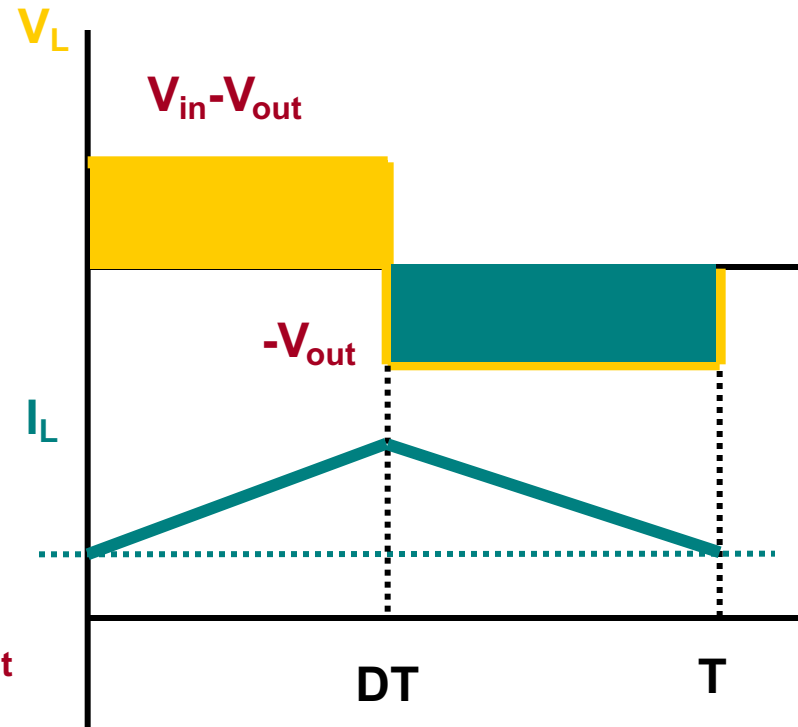
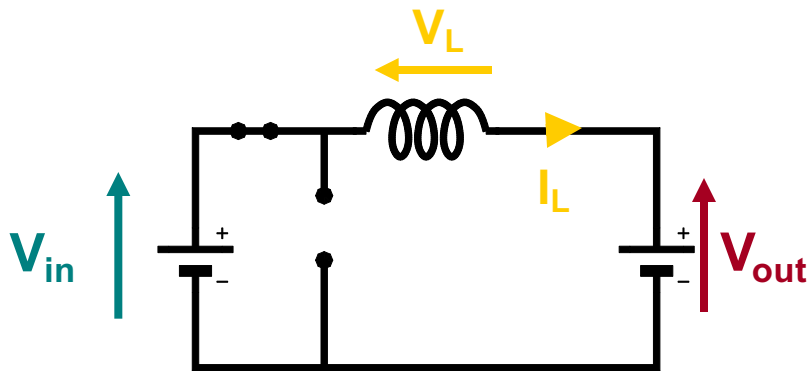
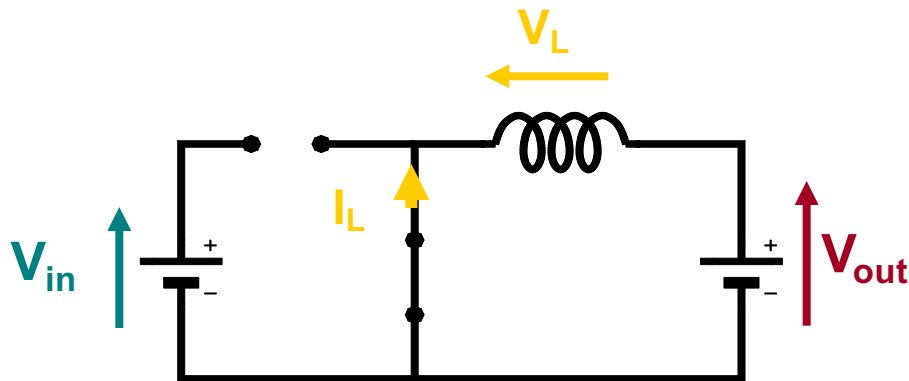
Al cerrar el MOSFET, el diodo queda cortado:



Al abrir el MOSFET, la corriente circula por el diodo:



## Formas de onda en MCC

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

La tensión media en la bobina debe ser nula:

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



$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

Debe cumplirse:  $V_{in} > V_{out}$

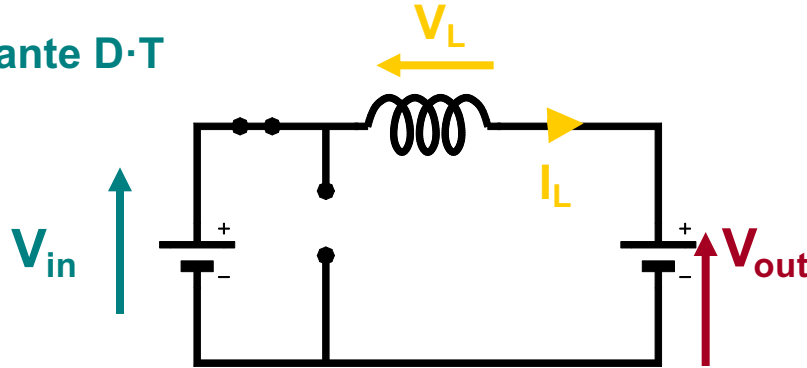


En MCC,  $V_{out}$  no depende de la carga

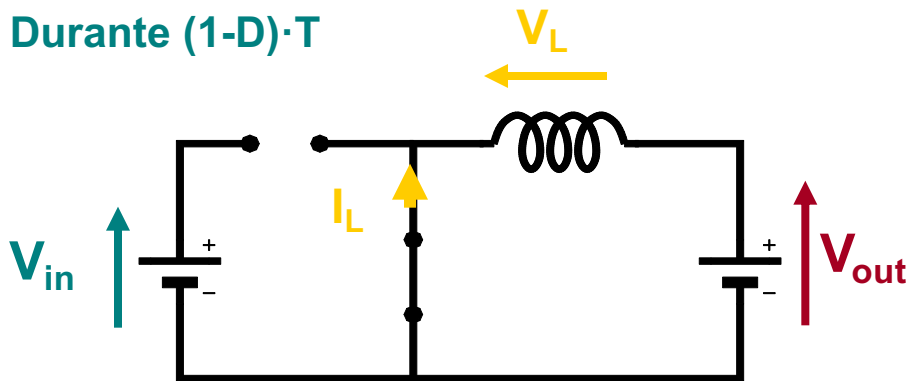
$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

Al igual que el rizado de corriente

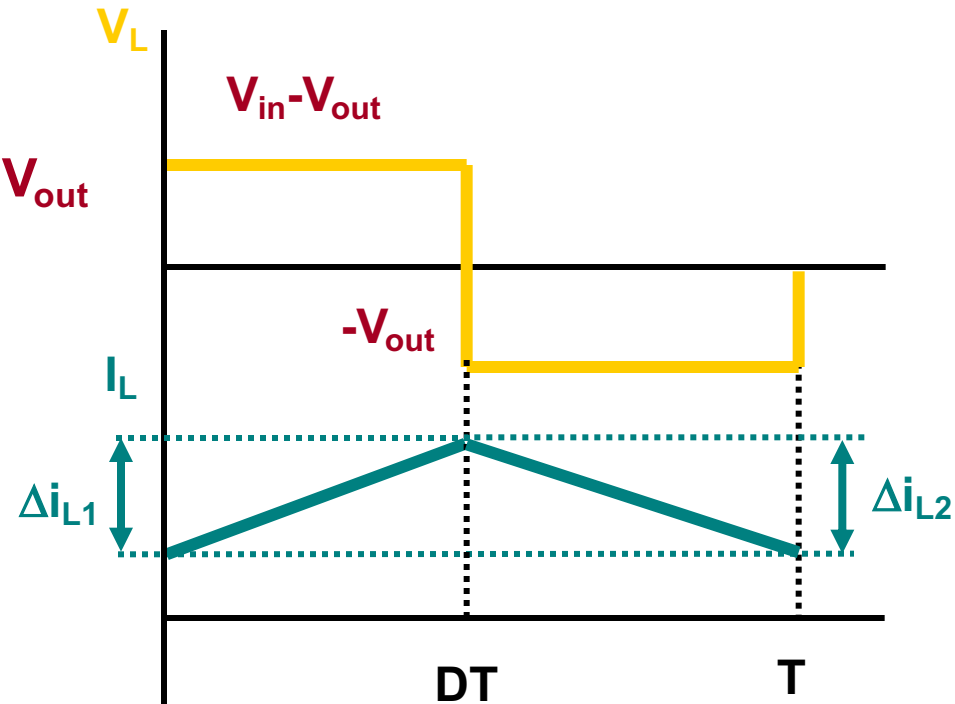
$$\Delta i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt$$

Durante  $D \cdot T$ 

$$\Delta i_{L1} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot D \cdot T$$

Durante  $(1-D) \cdot T$ 

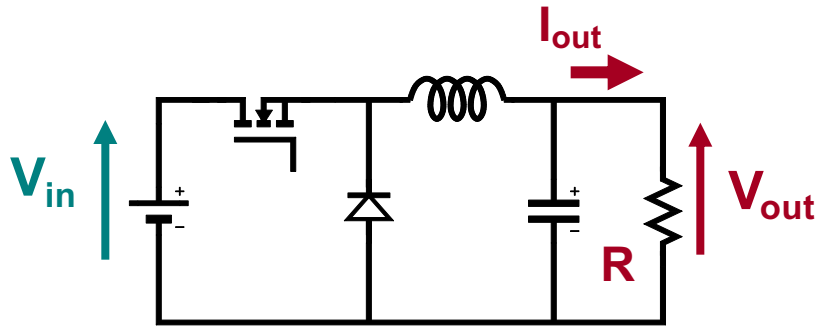
$$\Delta i_{L2} = \frac{1}{L} \cdot V_{out} \cdot (1-D) \cdot T$$



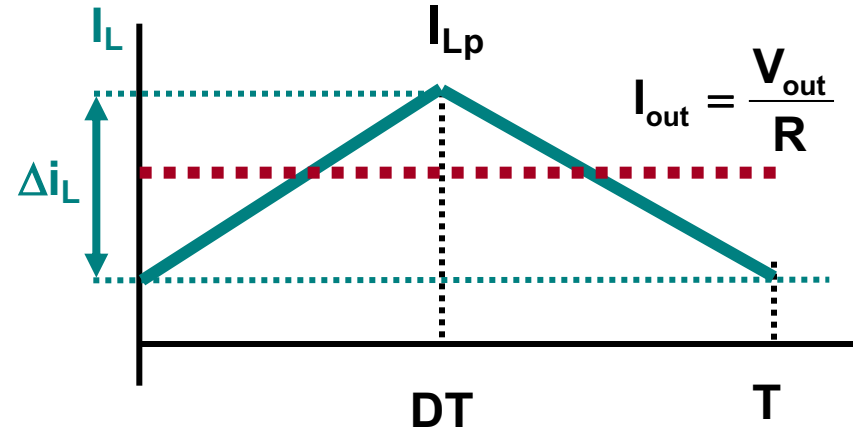
$$\Delta i_{L1} = \Delta i_{L2} = \Delta i_L$$

$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

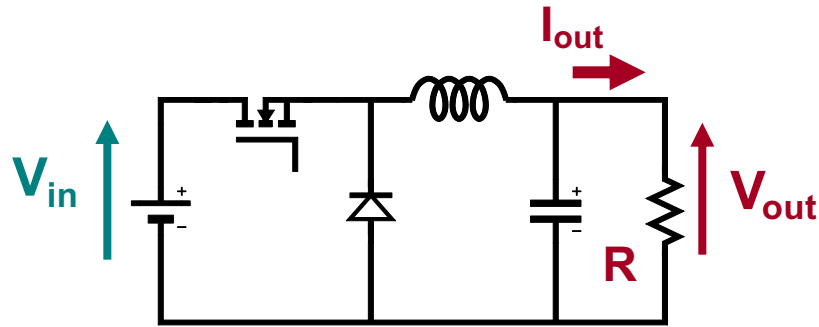
Un circuito de control mantiene  $V_{out}$  constante



$$I_{Lp} = I_{out} + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{out}}{R} + \frac{\Delta i_L}{2}$$



Un circuito de control mantiene  $V_{out}$  constante

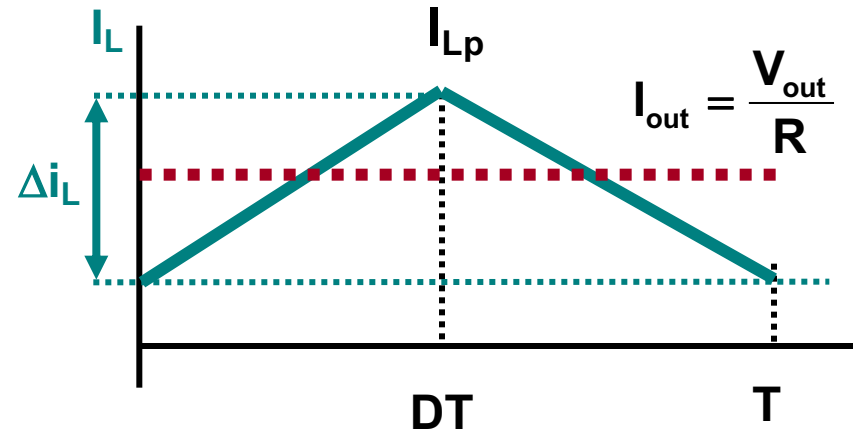


$$I_{Lp} = I_{out} + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{out}}{R} + \frac{\Delta i_L}{2}$$

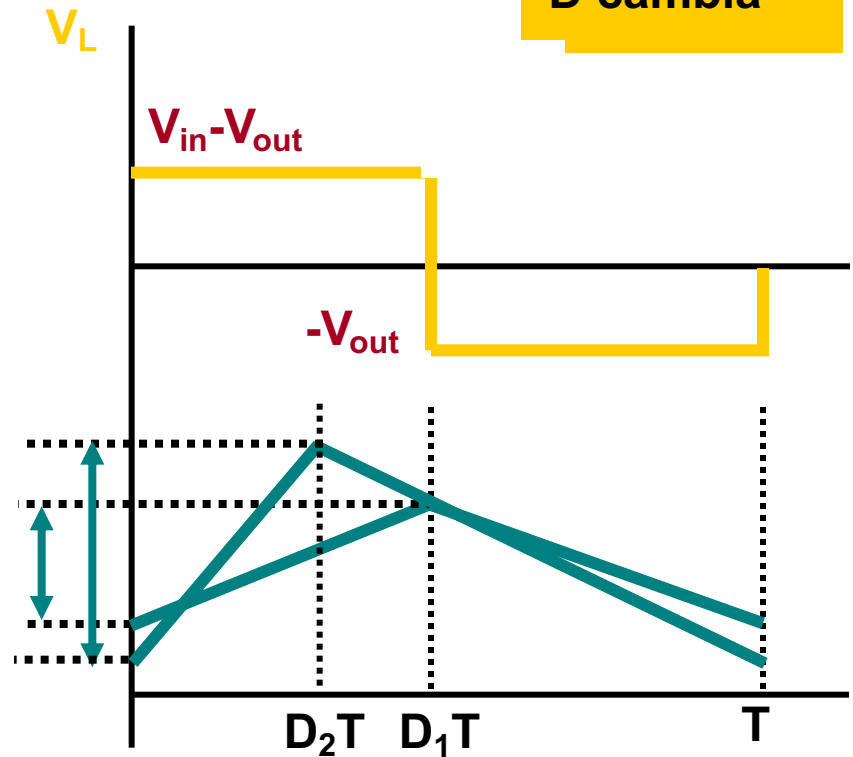
$V_{in}$

Cambia la tensión de entrada

$I_{out}$



D cambia



Todos los elementos son ideales



No hay pérdidas



La potencia de entrada es igual a la potencia de salida

$$P_{in} = P_{out}$$

$$V_{in} I_{in} = V_{out} I_{out}$$

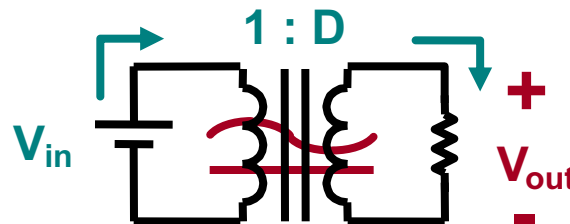
$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

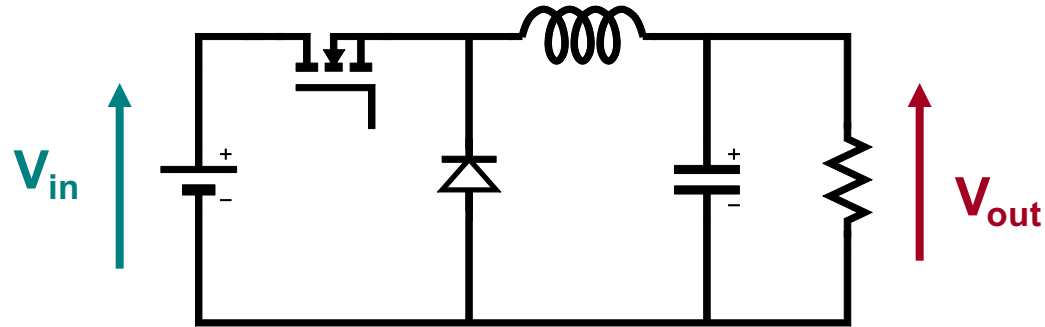
$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{1}{D}$$



Transformador de tensión continua

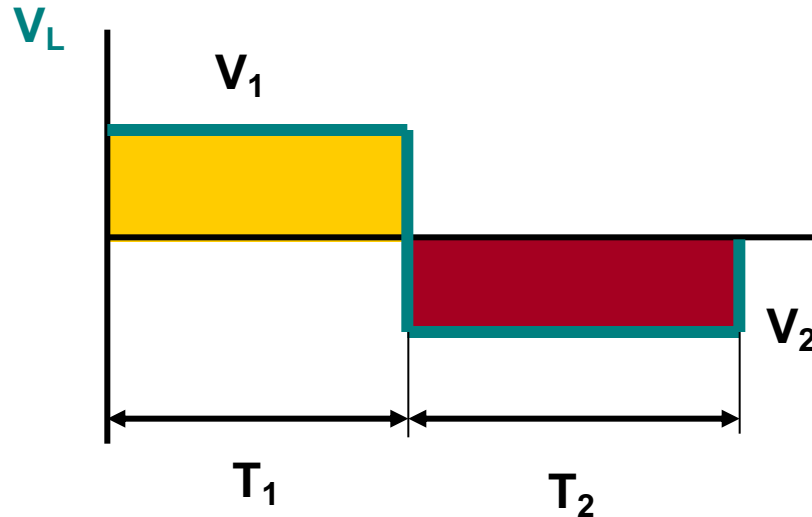
Relación de transformación controlable mediante el ciclo de trabajo





Si mantenemos D constante,  $V_{out}$  sigue a la tensión de entrada  
Se comporta como un transformador de continua

En régimen permanente, cualquier elemento magnético debe tener un valor medio de tensión **NULO**.



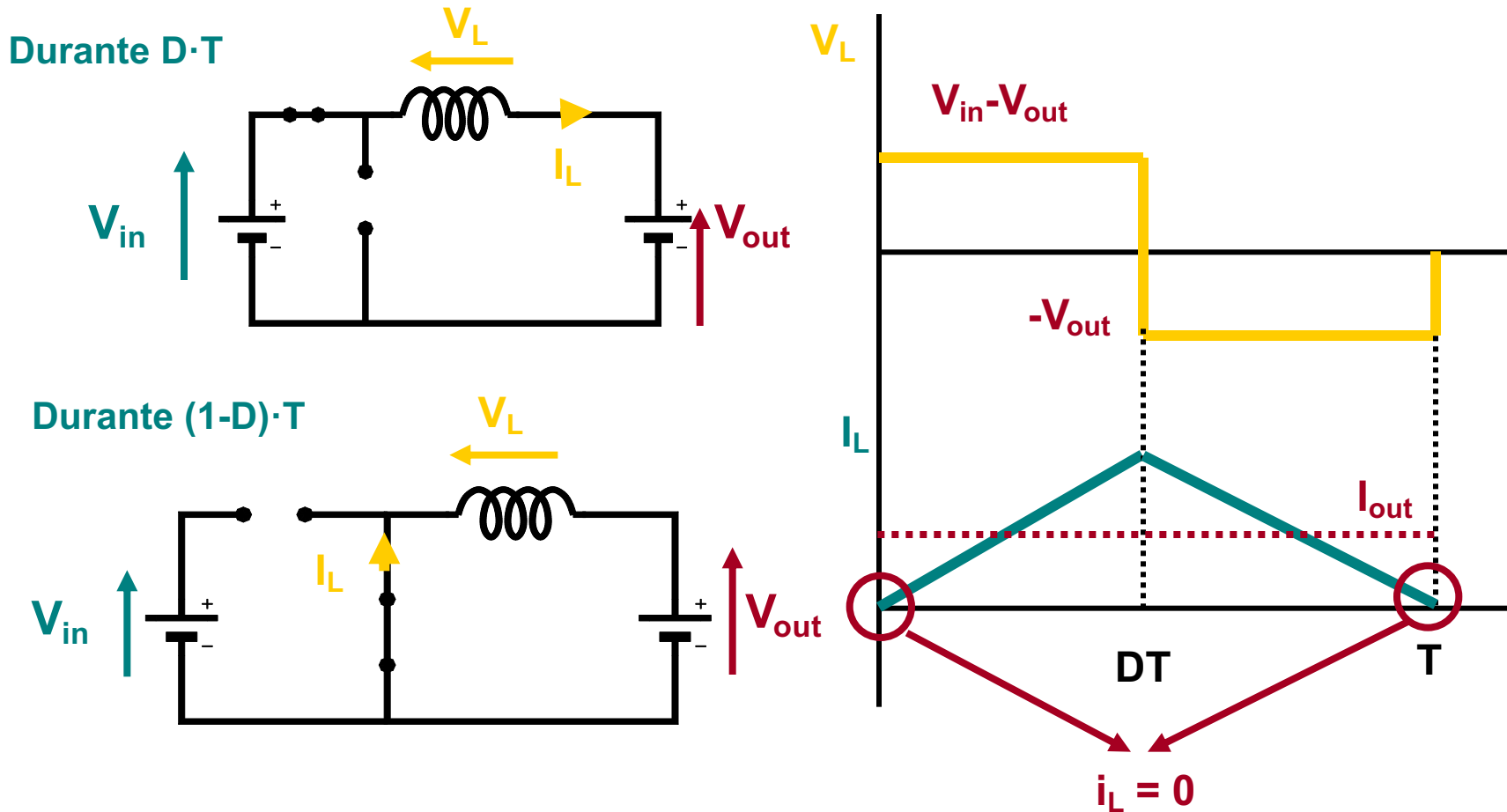
El área positiva debe ser igual a la negativa:  $V_1 \cdot T_1 = V_2 \cdot T_2$

Para que un convertidor opere correctamente debe poder manejar un elemento magnético con una forma de onda similar a esta, o al menos con valor medio nulo.

## Límite entre MCC y MCD

Para estudiar el MCD es interesante estudiar el límite entre ambos modos de funcionamiento:

Sigue habiendo 2 estados de funcionamiento



Se sigue cumpliendo la expresión obtenida en MCC:

$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

## 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?

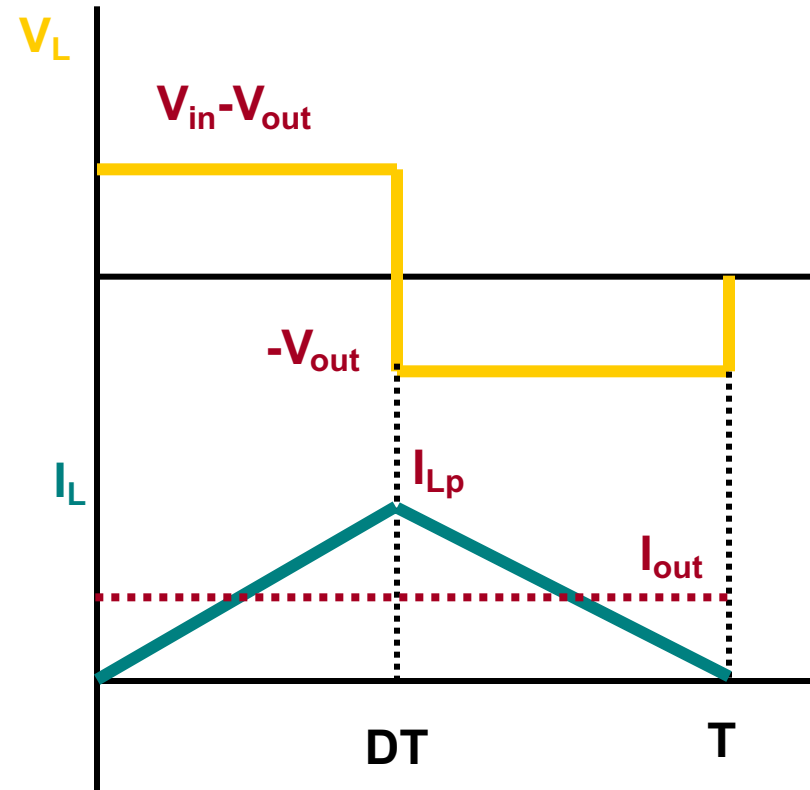
La corriente de pico es:

$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot D \cdot T$$

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

$$I_{out} = \bar{I}_L = \frac{1}{2} I_{Lp} = \frac{1}{2L} \cdot (V_{in} - V_{out}) \cdot D \cdot T$$

Se cumple:  $V_{out} = V_{in} \cdot D$



Por tanto:

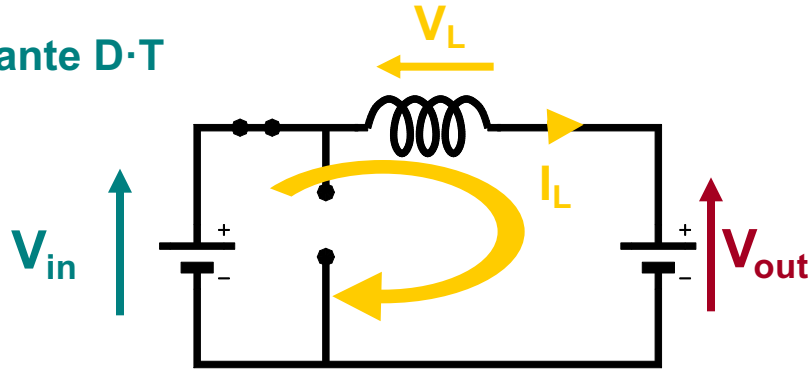
$$L_{lim} = \frac{V_{out} \cdot T}{2 \cdot I_{out}} \cdot (1 - D)$$



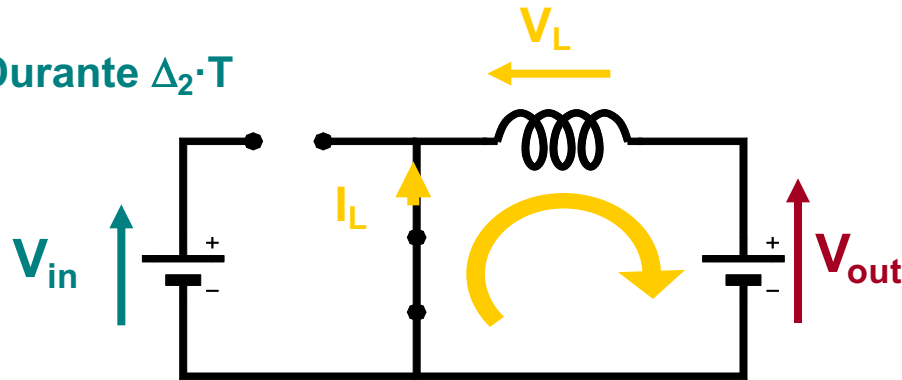
## Operación en MCD

Hay 3 estados de funcionamiento

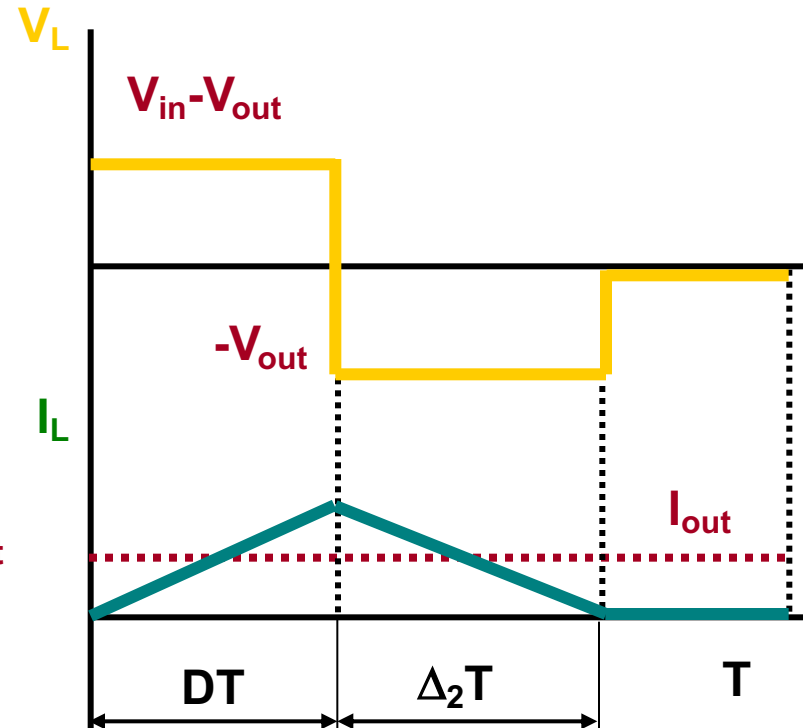
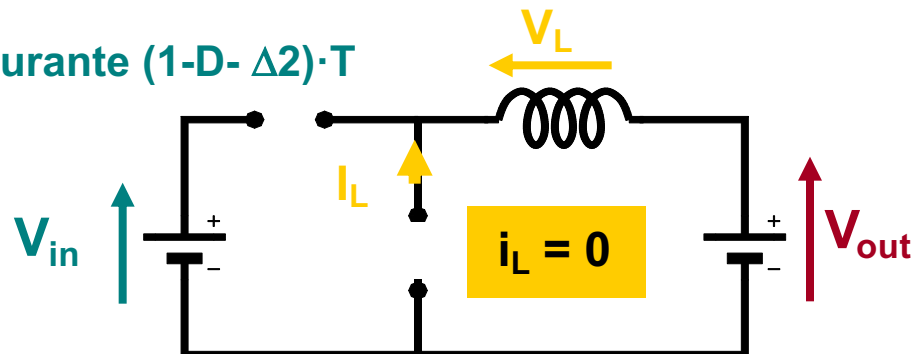
Durante  $D \cdot T$



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:

$$(V_{in} - V_{out}) \cdot D = V_{out} \cdot \Delta_2$$

La corriente de pico es:

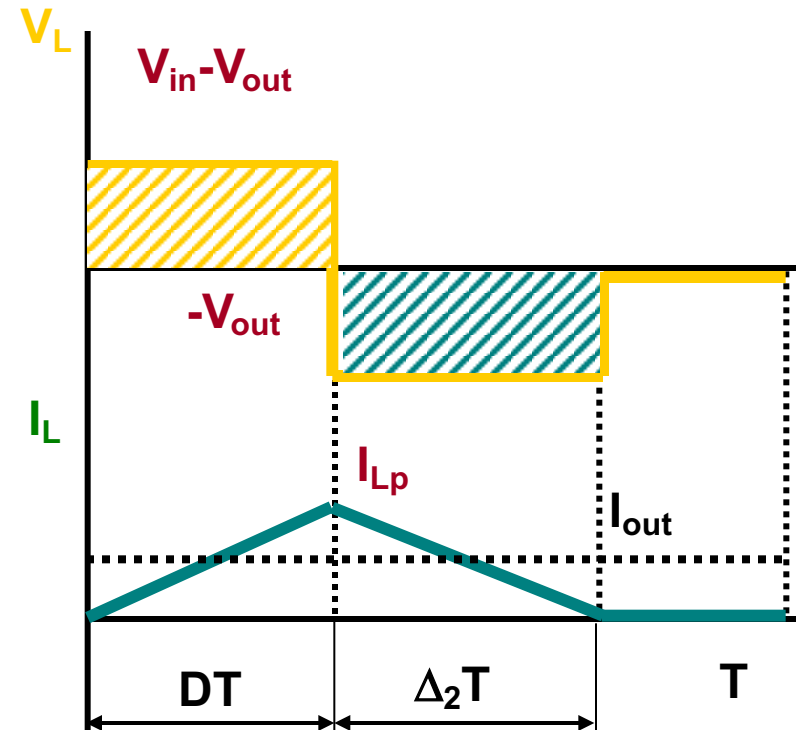
$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot V_{out} \cdot \Delta_2 \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{Lp} (D + \Delta_2) \quad \Bigg| \quad I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$$



$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}}}$$



$R_L$  es la carga de salida

## Operación en MCD

$$D = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}}}$$

**El ciclo de trabajo depende de la carga**

**El valor de L también influye en el ciclo de trabajo**

### Operación en MCD

**El valor de  $L$  influye en el ciclo de trabajo**

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

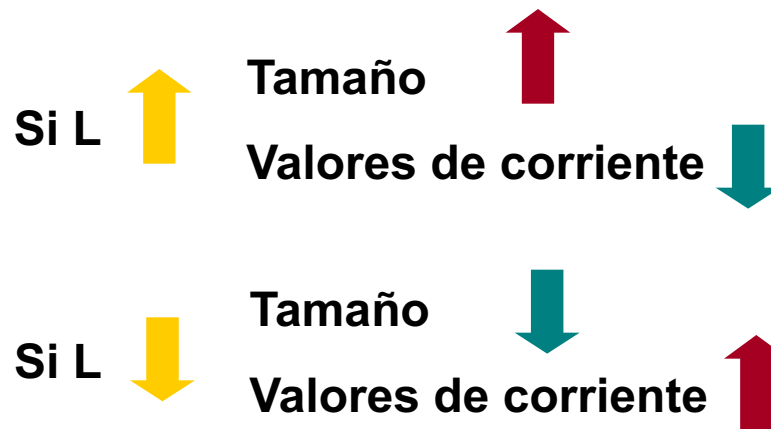
### Elección del valor de L

La elección del valor de la bobina corre a cargo del criterio del diseñador  
En algún caso puede ser necesario tener un rizado de corriente específico

### Elección del punto límite entre MCD y MCC

#### Solución de compromiso

- Tamaño
- Rizado de corriente  
(valor de pico de la corriente)



Criterios de elección típicos son  $1/3$  ó  $1/4$  de la potencia máxima.

## Cálculo de la bobina

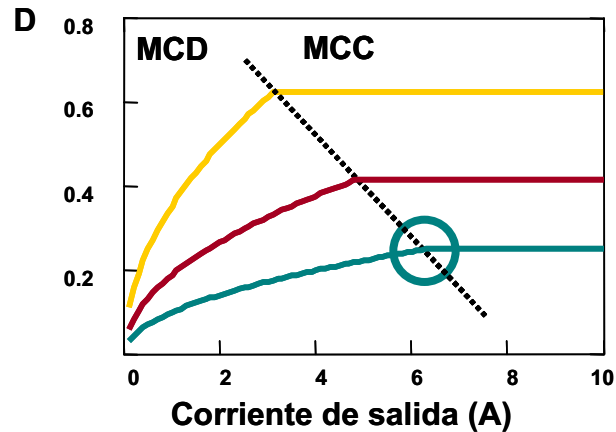
### Objetivo

Que el convertidor pase de MCD a MCC en un cierto valor de potencia ( $P_{lim}$ )

Corriente de salida en ese caso  $I_{0L} = \frac{P_{lim}}{V_{out}}$

El convertidor va a operar dentro de un rango de tensión de entrada

Por tanto, debemos tomar el caso peor: Tensión de entrada máxima con ciclo de trabajo mínimo.



Con  $I_{0L}$  y  $D_{min}$  obtenemos el valor de la  $L$  necesaria:

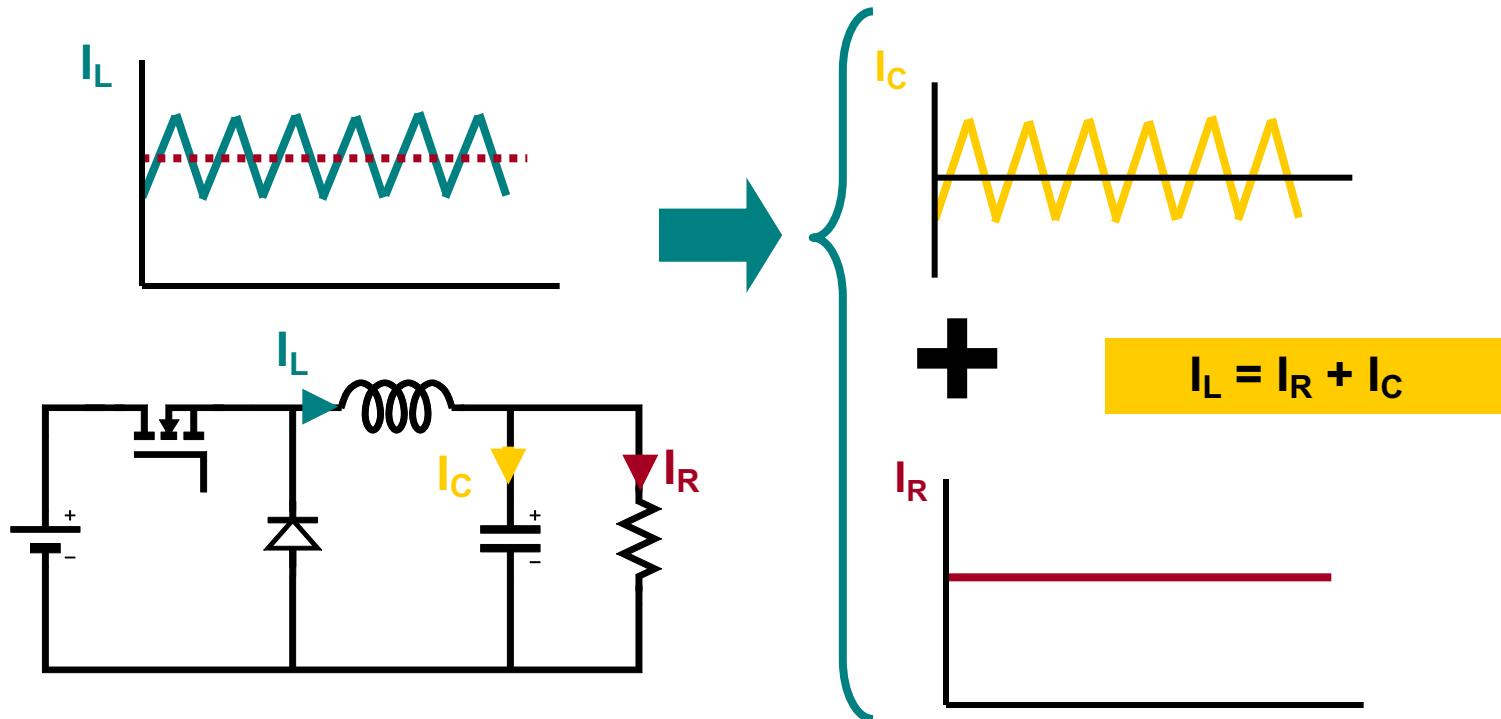
$$L_{mcd} = \frac{V_{out} \cdot T}{2 \cdot I_{oL}} \cdot (1 - D_{min})$$

## Cálculo del condensador

Hasta ahora hemos asumido que el rizado de la tensión de salida era nulo

Suponemos

- El rizado de corriente circula en su totalidad por el condensador
- Por la carga únicamente circula el valor medio de la corriente de la bobina



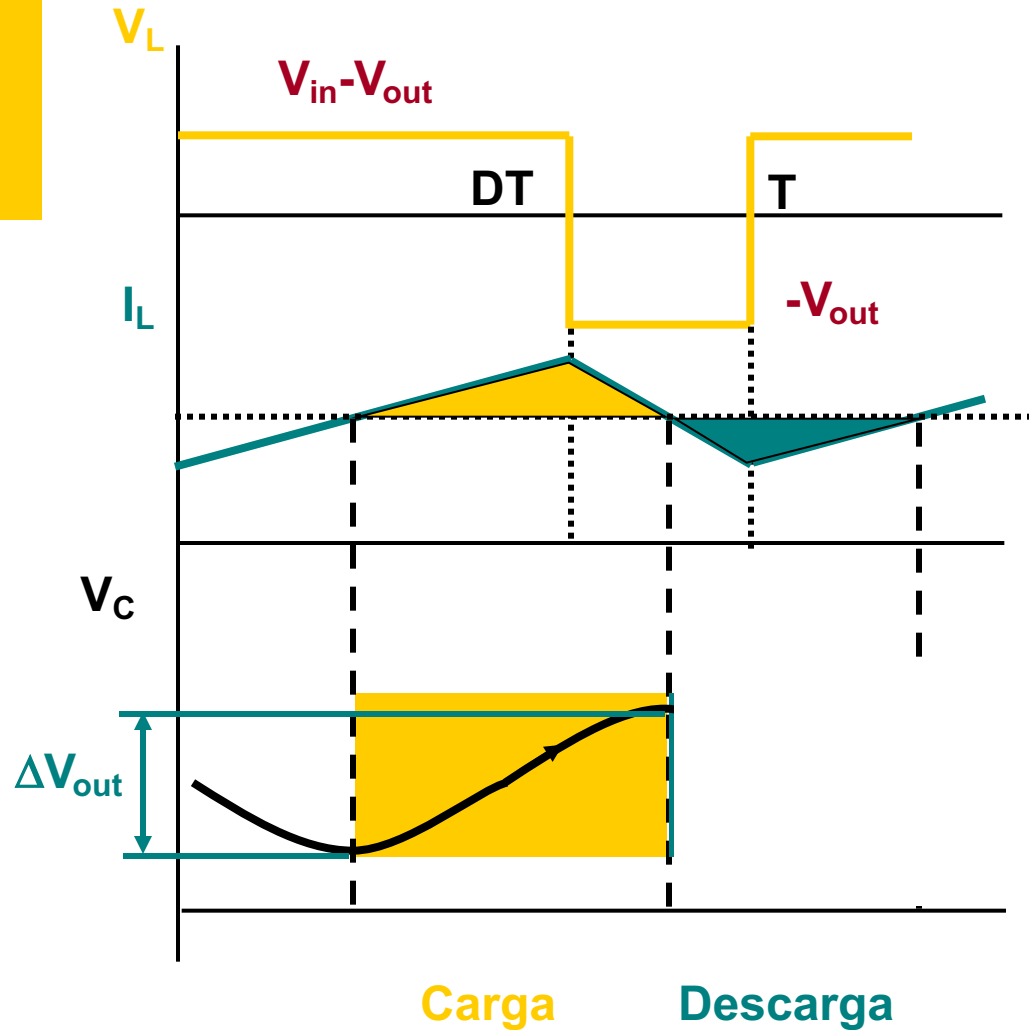
## 5. CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PASIVOS

### Cálculo del condensador

El rizado de corriente por la bobina genera un rizado de tensión en el condensador

Una de las especificaciones técnicas de un convertidor CC/CC suele ser el rizado máximo admisible

### Formas de onda





## Cálculo del condensador

El rizado pico-pico en el condensador será:

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2} \cdot \frac{\Delta i_L}{2}$$

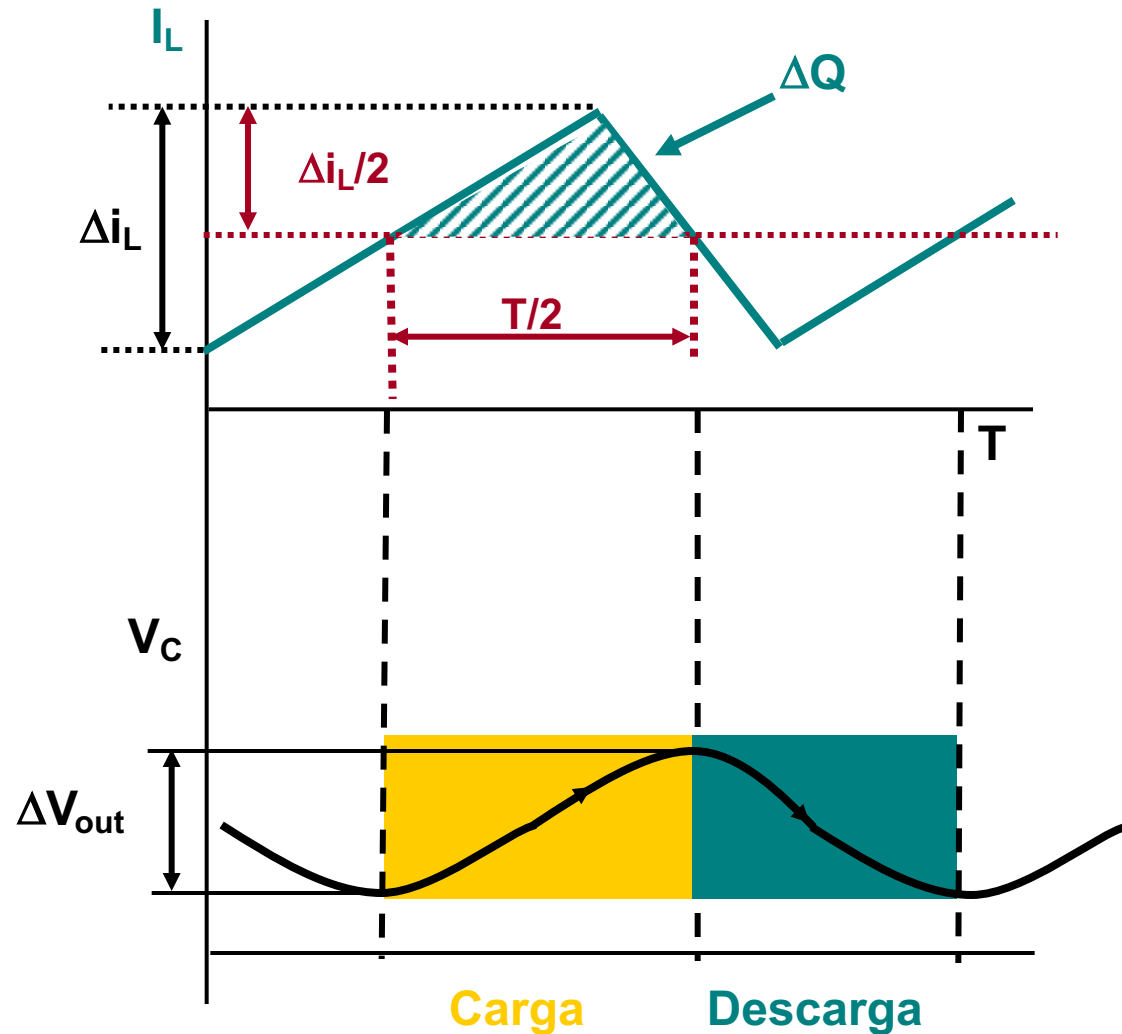
Durante (1-D):

$$\Delta i_L = \frac{V_{\text{out}}}{L} \cdot (1-D) \cdot T$$

Por tanto:

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot T^2}{8 \cdot L \cdot C} \cdot (1-D)$$

## Formas de onda

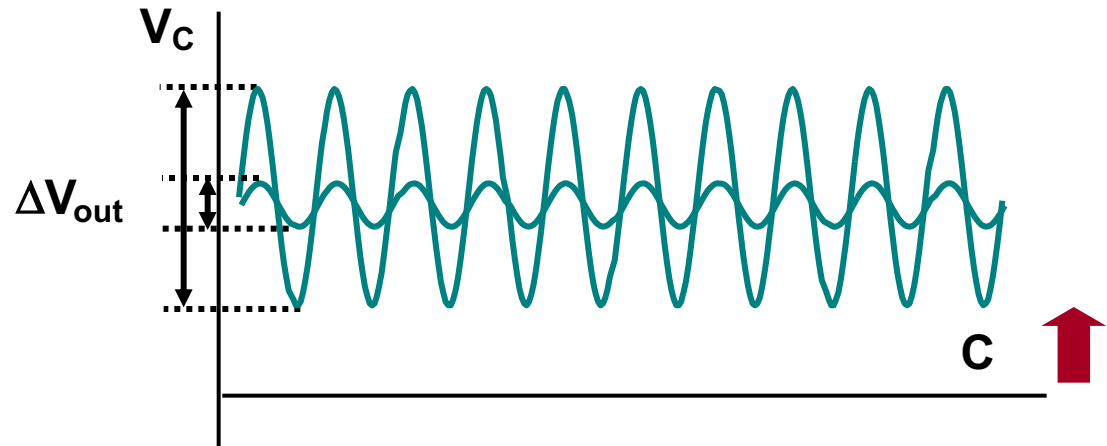


Conocido el valor de  $L$  y tomando como dato  $\Delta V_{\text{out}}$  podemos calcular  $C$

## Cálculo del condensador

Conocido el valor de L y tomando como dato  $\Delta V_{out}$  podemos calcular C

$$C = \frac{V_{out} \cdot T^2}{8 \cdot L \cdot \Delta V_{out}} \cdot (1 - D)$$



Las especificaciones de rizado se deben cumplir en cualquier condición de trabajo

Debemos diseñar C para el peor caso:  $D_{min}$  ( $V_{max}$ )

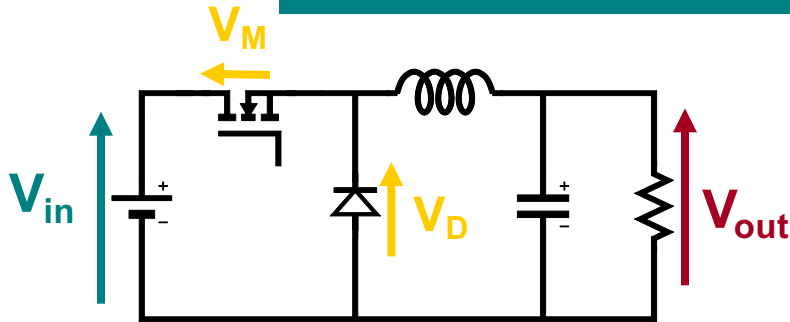
Factores que influyen

Si la frec. de conmutación	↑	C	↓
En MCC, el valor de L	↑	C	↓
Si $\Delta V_{out}$	↓	C	↑

## Convertidor Reductor en MCC

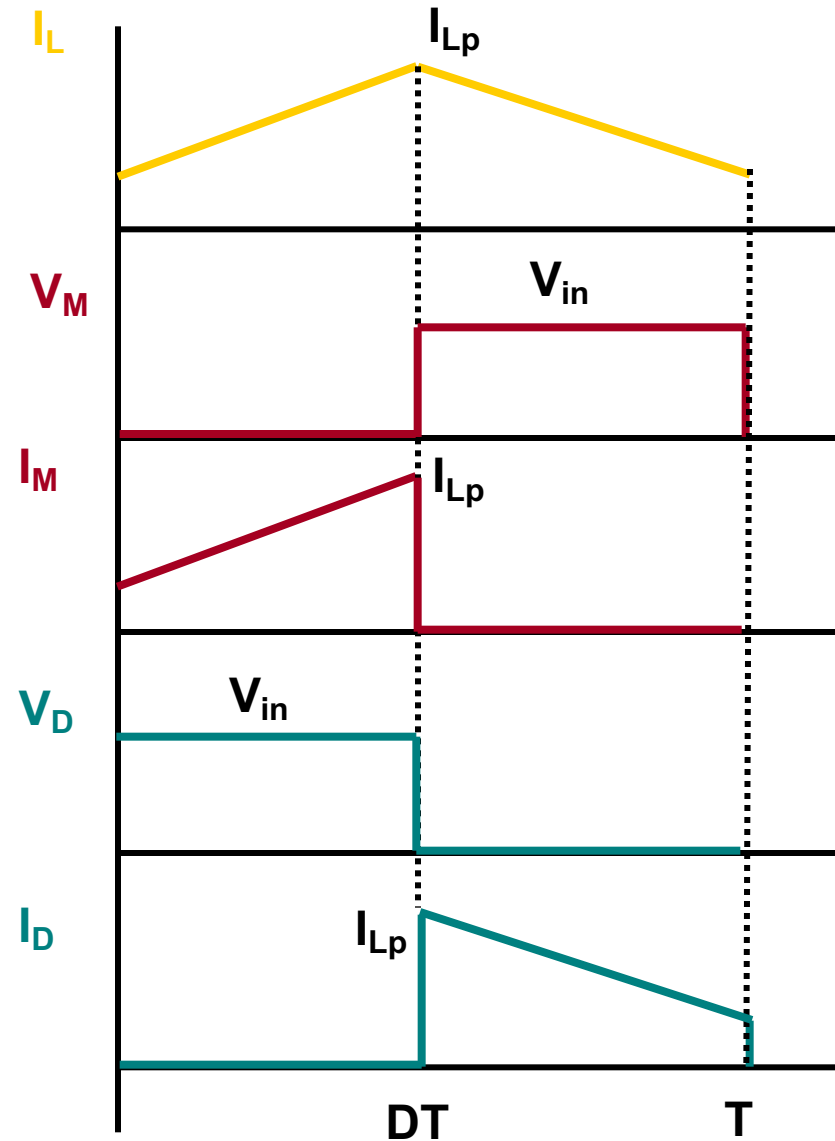
## Objetivo

Conocer cuáles son las tensiones y las corrientes que deben manejar los semiconductores (*stress*).



$$V_{Mmax} = V_{in}$$

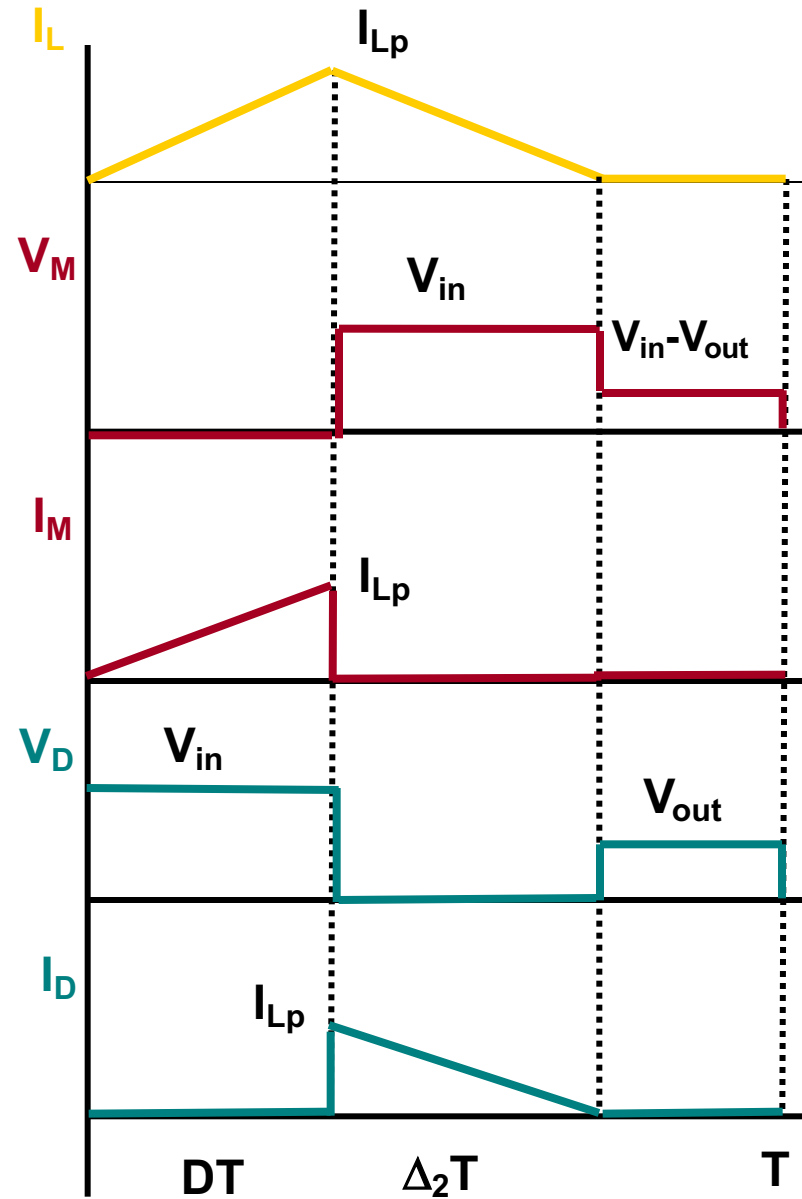
$$V_{Dmax} = V_{in}$$



## Convertidor Reductor en MCD

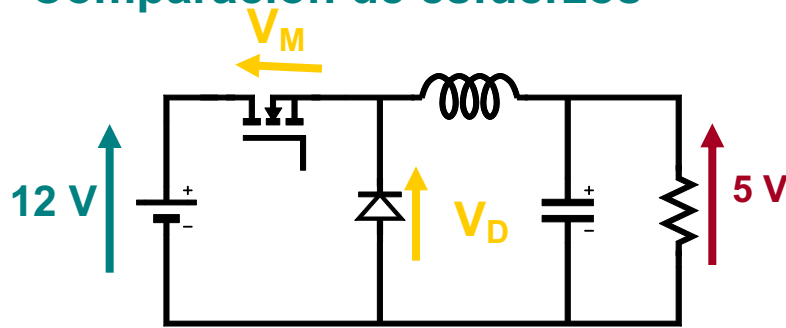


$$V_{Dmax} = V_{in}$$



## 6. ESFUERZOS EN LOS SEMICONDUCTORES

### Comparación de esfuerzos



Los esfuerzos de tensión son los mismos que en MCC

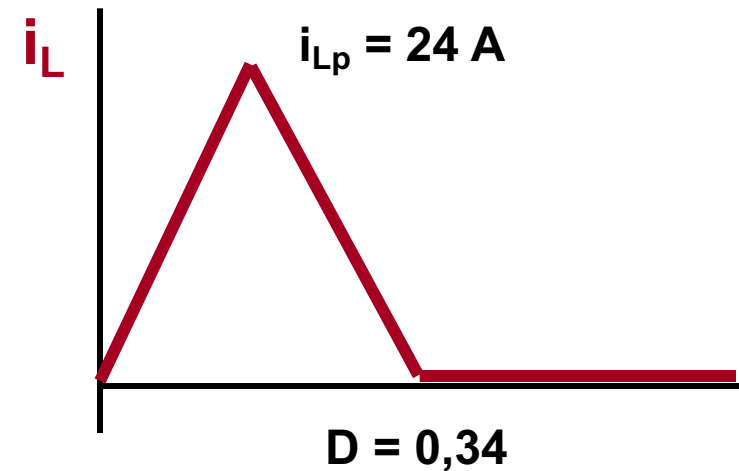
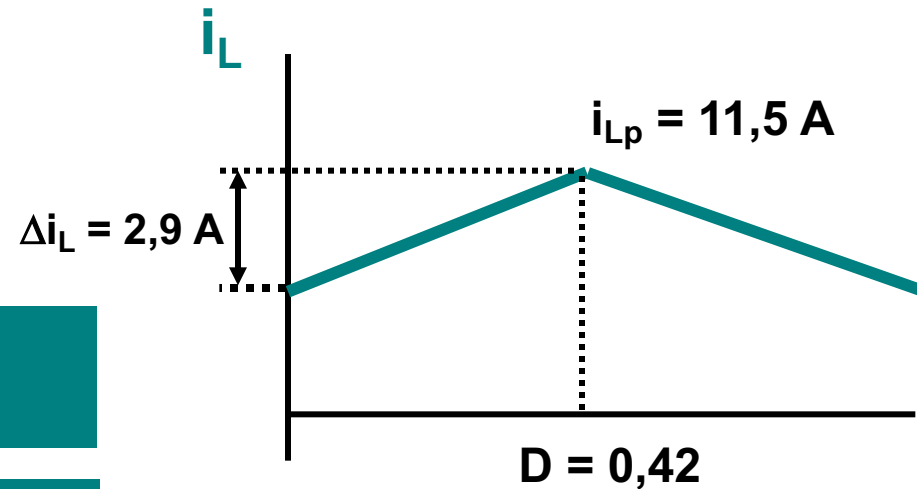
Esfuerzos de corriente mayores en MCD

### Mismas condiciones

$V_{in} = 12 \text{ V}$	$P_{out} = 50 \text{ W}$
$V_{out} = 5 \text{ V}$	$I_{out} = 10 \text{ A}$

$L = 10 \mu\text{H}$  → MCC →  $i_{Lp} = 11,5 \text{ A}$

$L = 1 \mu\text{H}$  → MCD →  $i_{Lp} = 24 \text{ A}$



**El convertidor Reductor tiene un gran número de aplicaciones industriales**

- **Sencillo**
- **Robusto**
- **Buenas prestaciones dinámicas**
- **Muy eficiente**

### **Aplicaciones actuales**

- **Posreguladores de tensión**
- **Microprocesadores**
- **Automóvil**
- **Con tiristores se utiliza para grandes potencias**

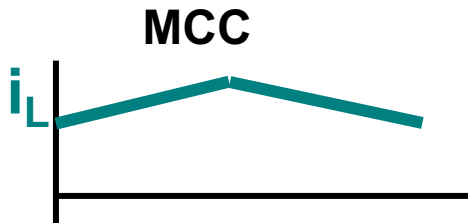
**Modificando la topología básica se pueden mejorar las prestaciones**

# El convertidor REDUCTOR

$$V_{in} > V_{out}$$

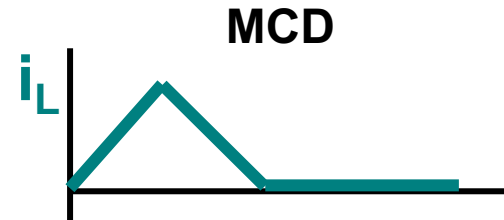
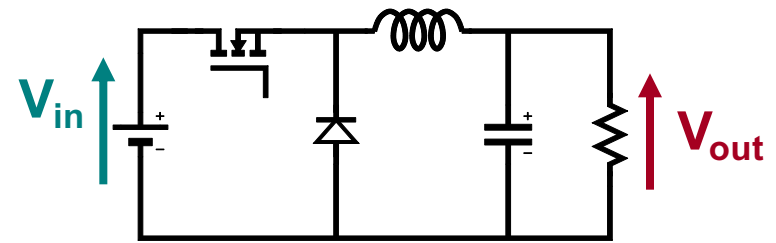
Idealmente sin pérdidas

2 modos de funcionamiento



$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

- D Independiente de la carga
- Valores de L altos
- Corrientes pequeñas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$



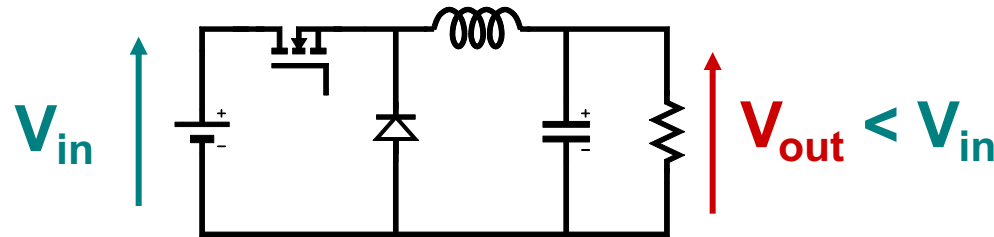
$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}}}$$

- D Depende de la carga
- Valores de L bajos
- Corrientes elevadas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$

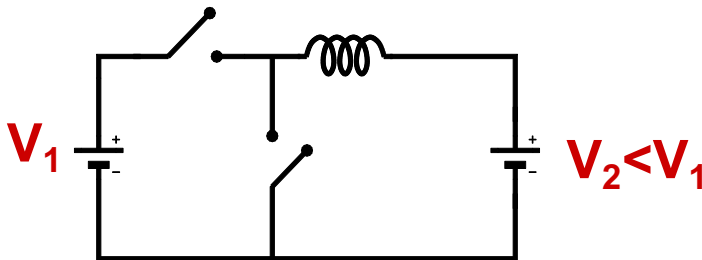
- Cálculo de bobina y condensador
- Aplicaciones

## Convertidor Elevador (*Boost*)

Como hemos visto, el convertidor reductor transforma una tensión continua en otra de valor más pequeño.



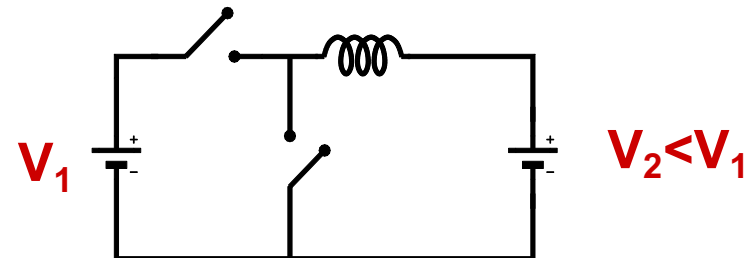
Utilizando la misma filosofía podríamos intentar hacer la operación inversa, es decir, transformar una tensión continua en otra de valor más grande.



Reductor



Flujo de potencia



Elevador

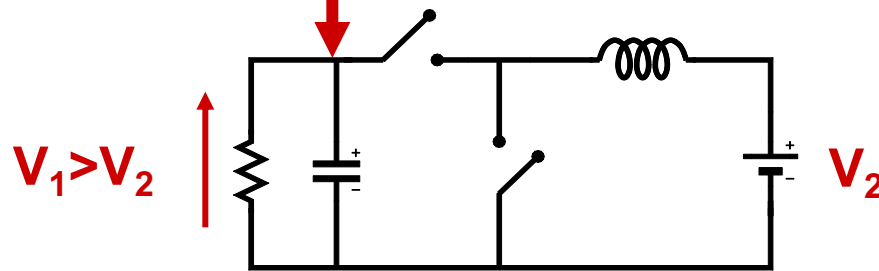


Flujo de potencia



# Convertidor Elevador

El condensador mantiene la tensión de salida constante



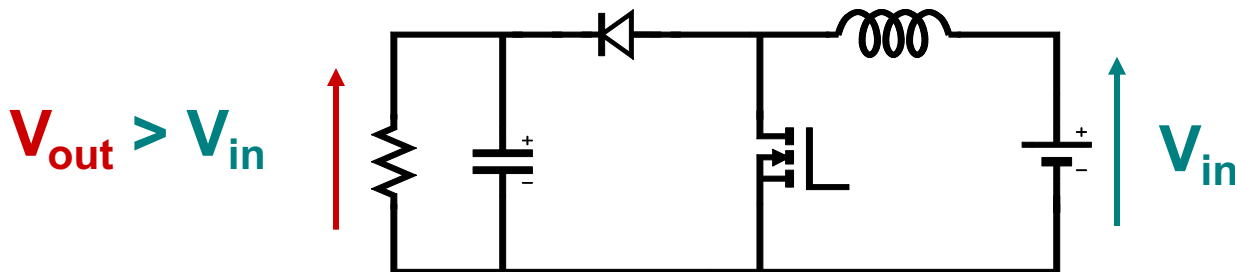
Carga



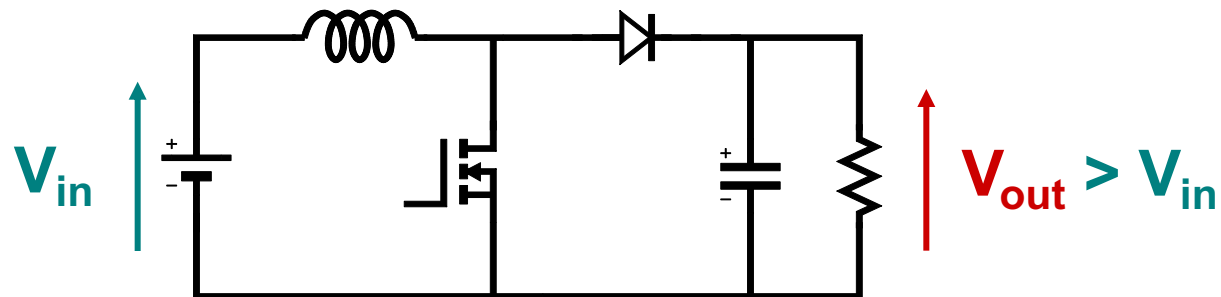
Fuente de energía

Flujo de potencia

Ponemos los semiconductores de forma que el flujo energético sea el adecuado y obtenemos el **Convertidor Elevador**:



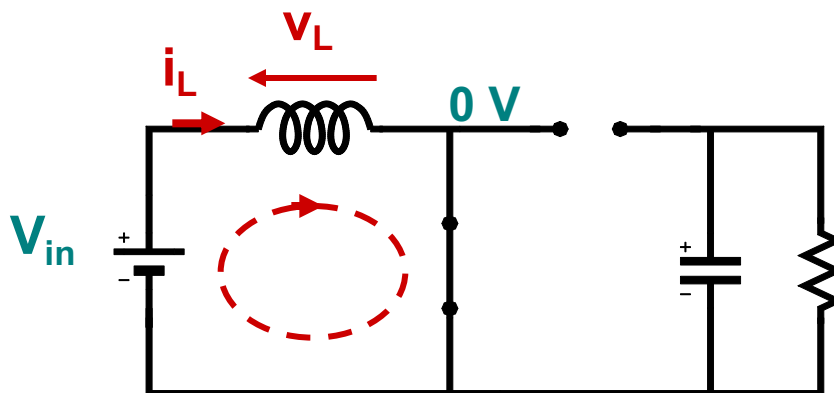
## Relación de transformación en MCC



El convertidor elevador en MCC también tiene 2 estados de funcionamiento:

1

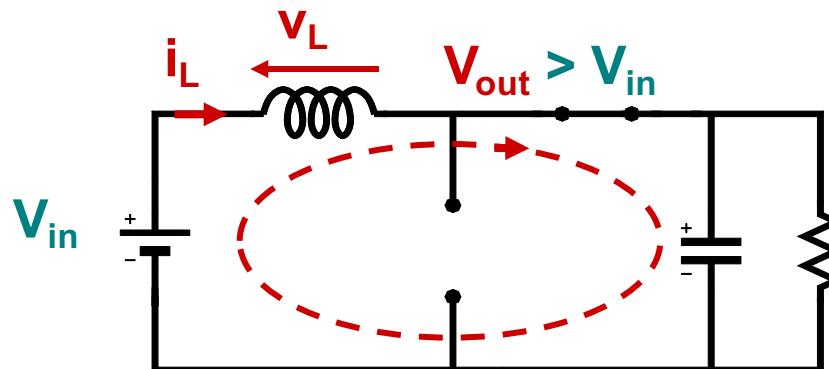
**Interrupción  
cerrado**



Carga de la bobina

2

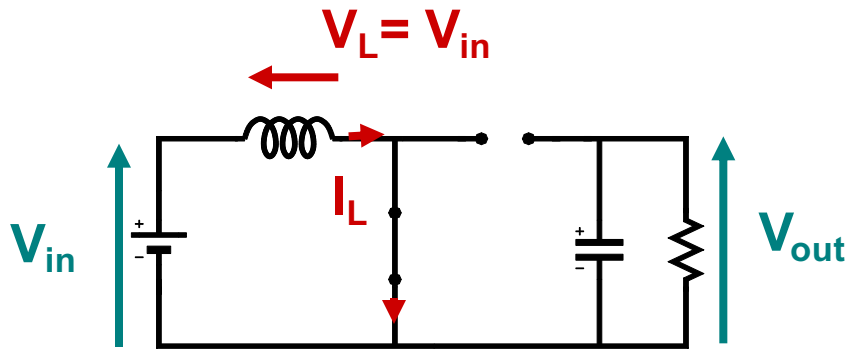
**Interrupción  
abierto**



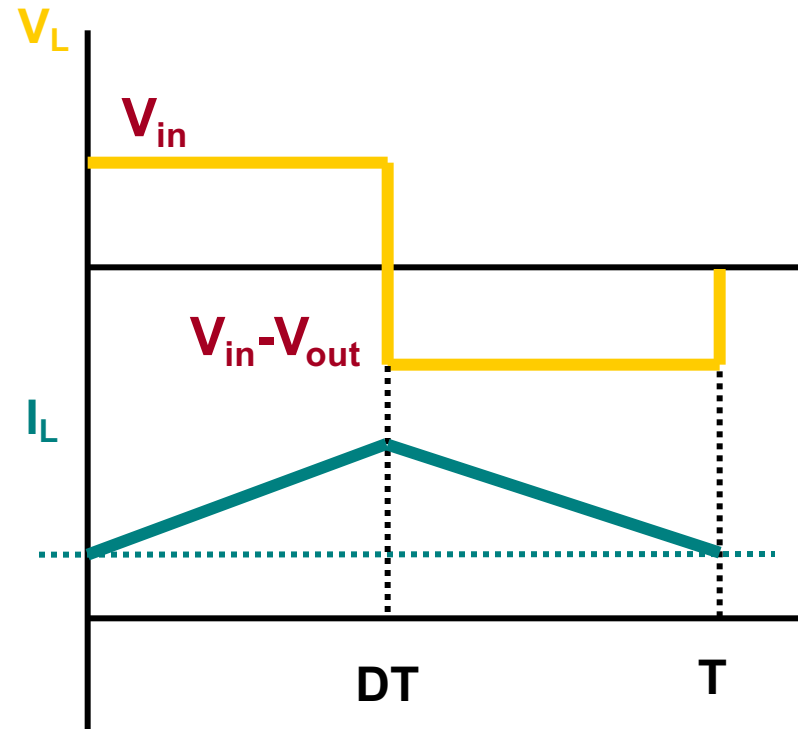
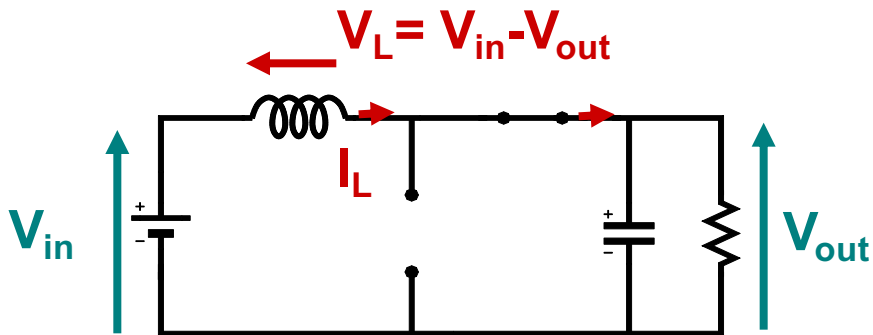
Descarga de la bobina

# Formas de onda en MCC

Durante  $D \cdot T$



Durante  $(1-D) \cdot T$



La tensión media en la bobina debe ser nula:

$$V_{in} \cdot D = (V_{out} - V_{in}) \cdot (1 - D) \quad \rightarrow \quad V_{out} = V_{in} \cdot \frac{1}{1 - D}$$

Debe cumplirse:  $V_{in} < V_{out}$

## 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:

$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

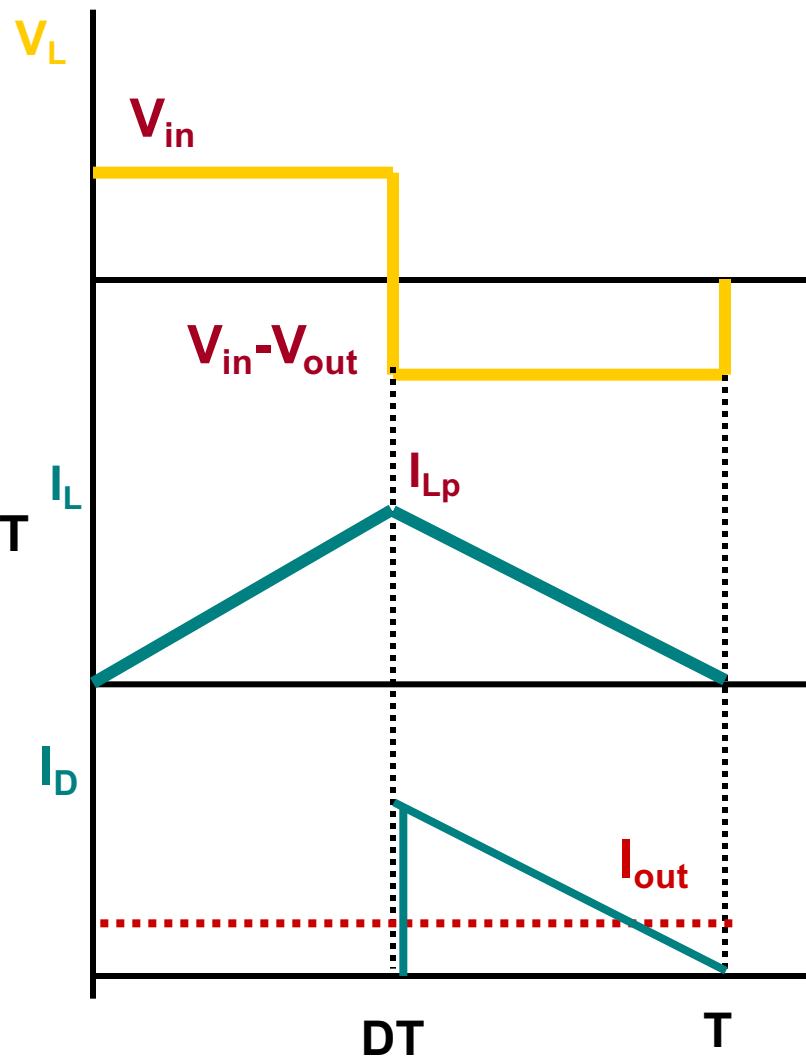
El valor medio de la corriente  $I_D$  es la corriente de salida:

$$I_{out} = \bar{I}_D = \frac{1}{2} I_{Lp} \cdot (1-D) = \frac{1}{2L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot (1-D) \cdot T$$

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

Por tanto:

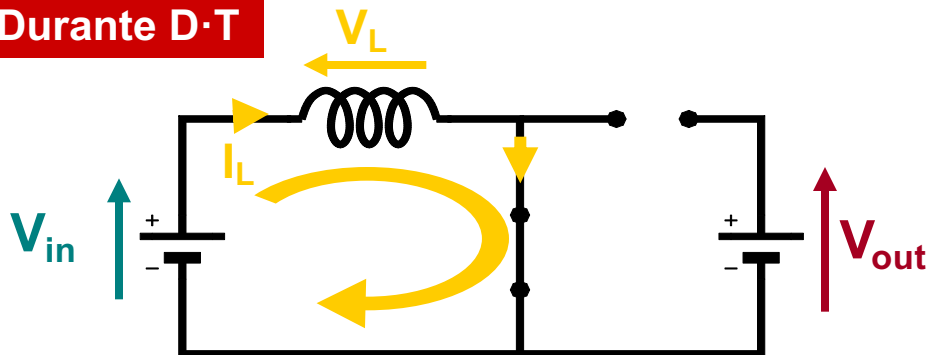
$$L_{LIM} = \frac{V_{out} \cdot T}{2 \cdot I_{out}} \cdot D \cdot (1-D)^2$$



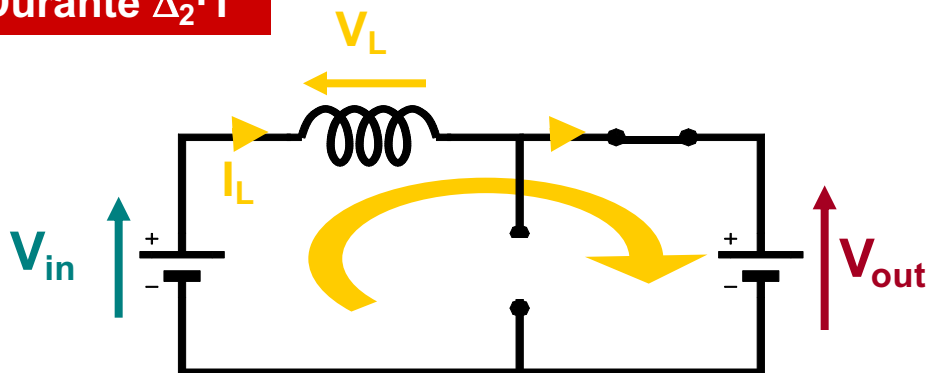
# Operación en MCD

Hay 3 estados de funcionamiento

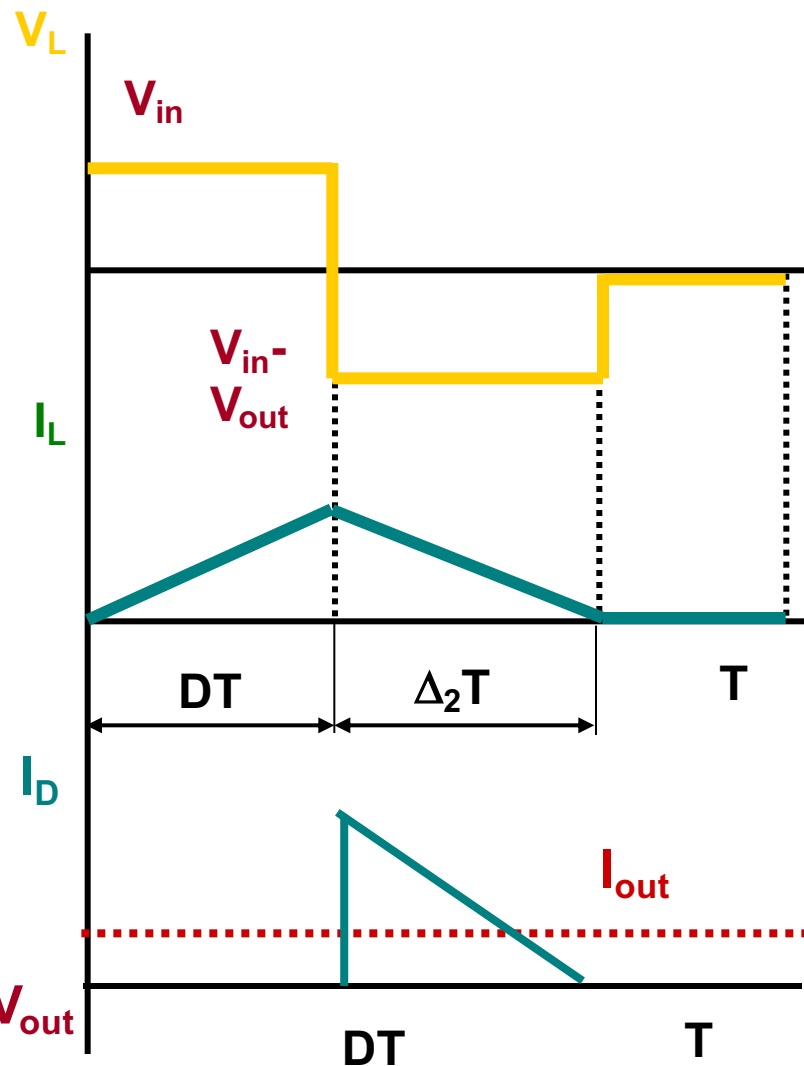
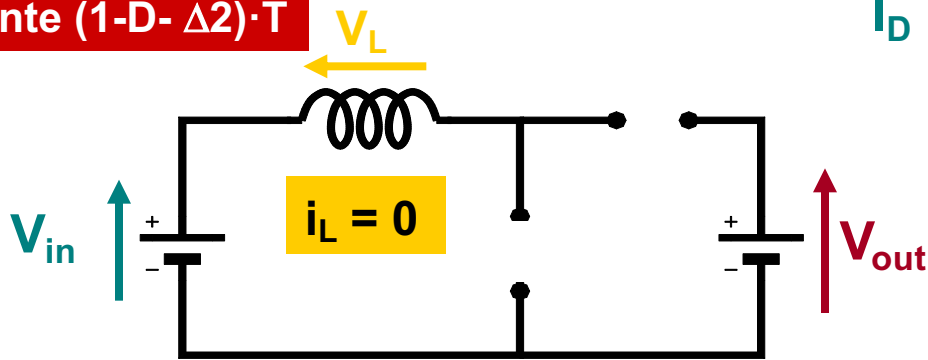
Durante  $D \cdot T$



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:

$$V_{in} \cdot D = (V_{out} - V_{in}) \cdot \Delta_2$$

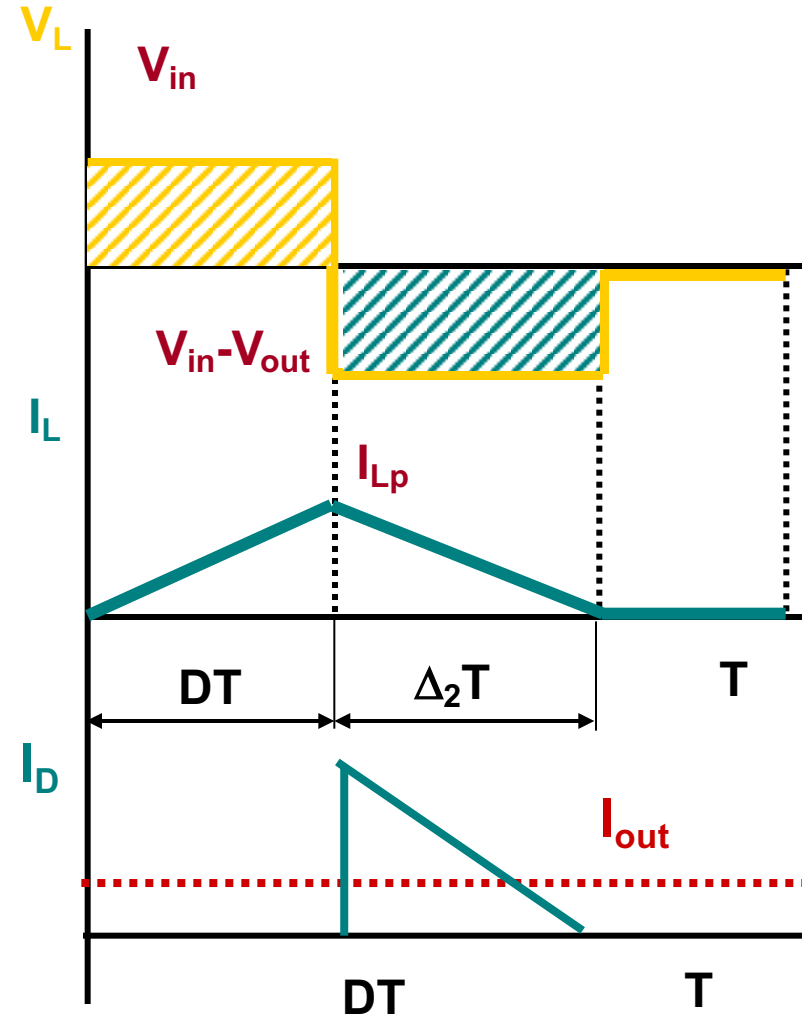
La corriente de pico es:

$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{Lp} \cdot \Delta_2 \quad I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \left(1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}\right)}$$



$R_L$  es la carga de salida

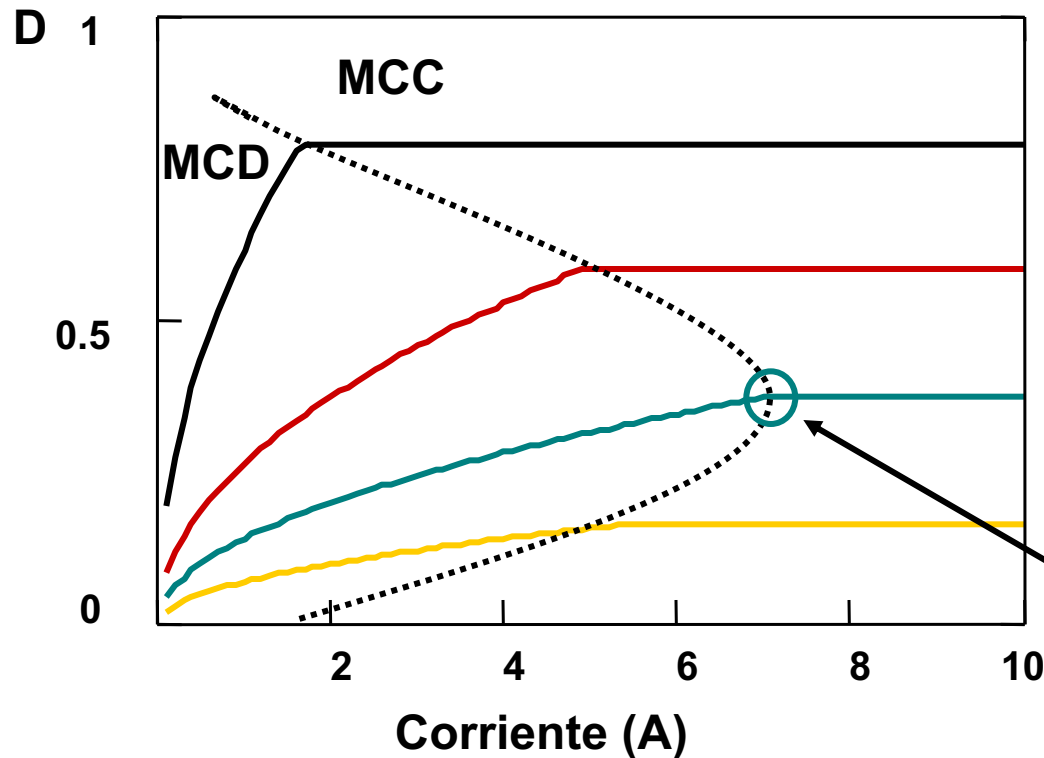
## Operación en MCD

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \left(1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}\right)}$$

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

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

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



$$V_{out} = 48 \text{ V}$$

$$V_{in} = 10 \text{ V}$$

$$V_{in} = 20 \text{ V}$$

$$V_{in} = 32 \text{ V}$$

$$V_{in} = 40 \text{ V}$$

Peor caso:  $D = 1/3$

## Operación en MCD

Peor caso para MCD



D=1/3

Bobina para trabajar en el modo límite:

$$L_{LIM} = \frac{V_{out} \cdot T}{2 \cdot I_{out}} \cdot D \cdot (1-D)^2$$

Es una función que depende del ciclo de trabajo:  $L_{LIM} = k \cdot D \cdot (1-D)^2$

Debemos obtener el valor máximo de L :

Máximo: D= 1/3

Mínimo: D= 0

Por tanto, las peores condiciones para operar en MCD se dan con D=1/3

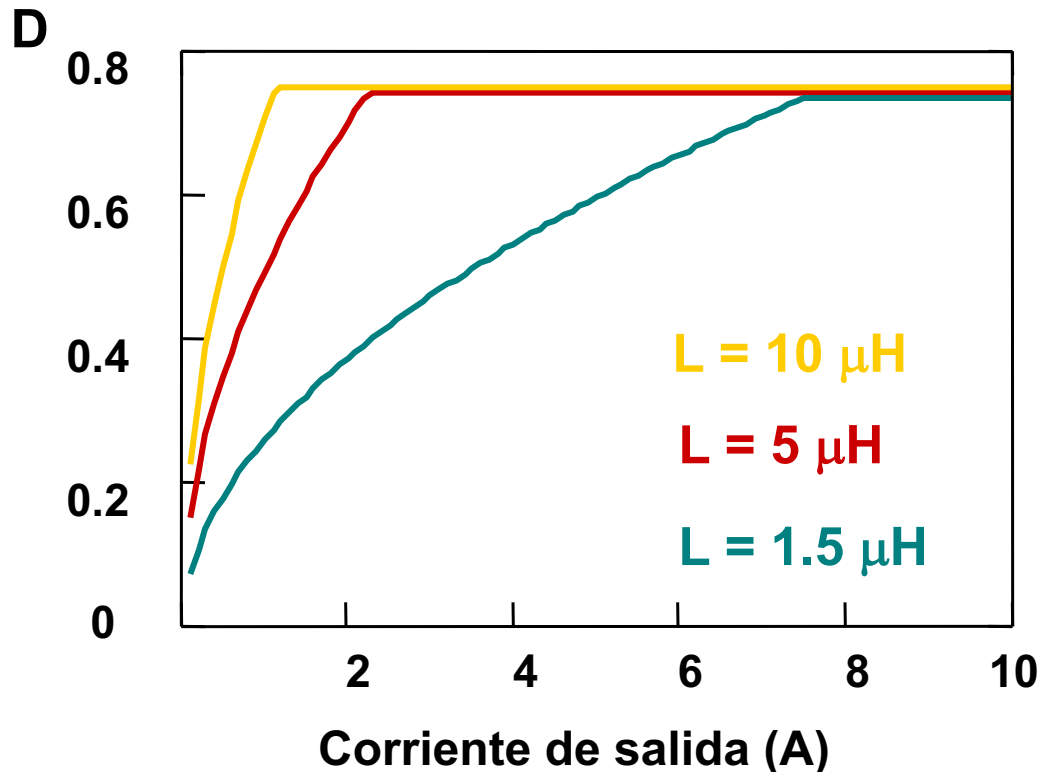


## Operación en MCD

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T}} \cdot \left(1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}\right)$$

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.



$V_{in} = 12 \text{ V}$

$V_{out} = 48 \text{ V}$

$L = 10 \mu\text{H}$

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

$L = 1.5 \mu\text{H}$

Corriente de salida (A)

**Solución de compromiso:**

- **Tamaño de la bobina (y por tanto, coste)**
- **Rendimiento (mejor rendimiento con corrientes más bajas)**



**Elección del diseñador**

**También puede ser que en las especificaciones se imponga:**

- **Un cierto rizado de corriente**
- **Operación siempre en MCD**
- **Operación en MCC hasta un cierto valor de potencia (P.ej:  $1/3 P_{\max}$ )**

## Cálculo del condensador

El rizado pico-pico en el condensador será:

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

En régimen permanente:

Carga = Descarga

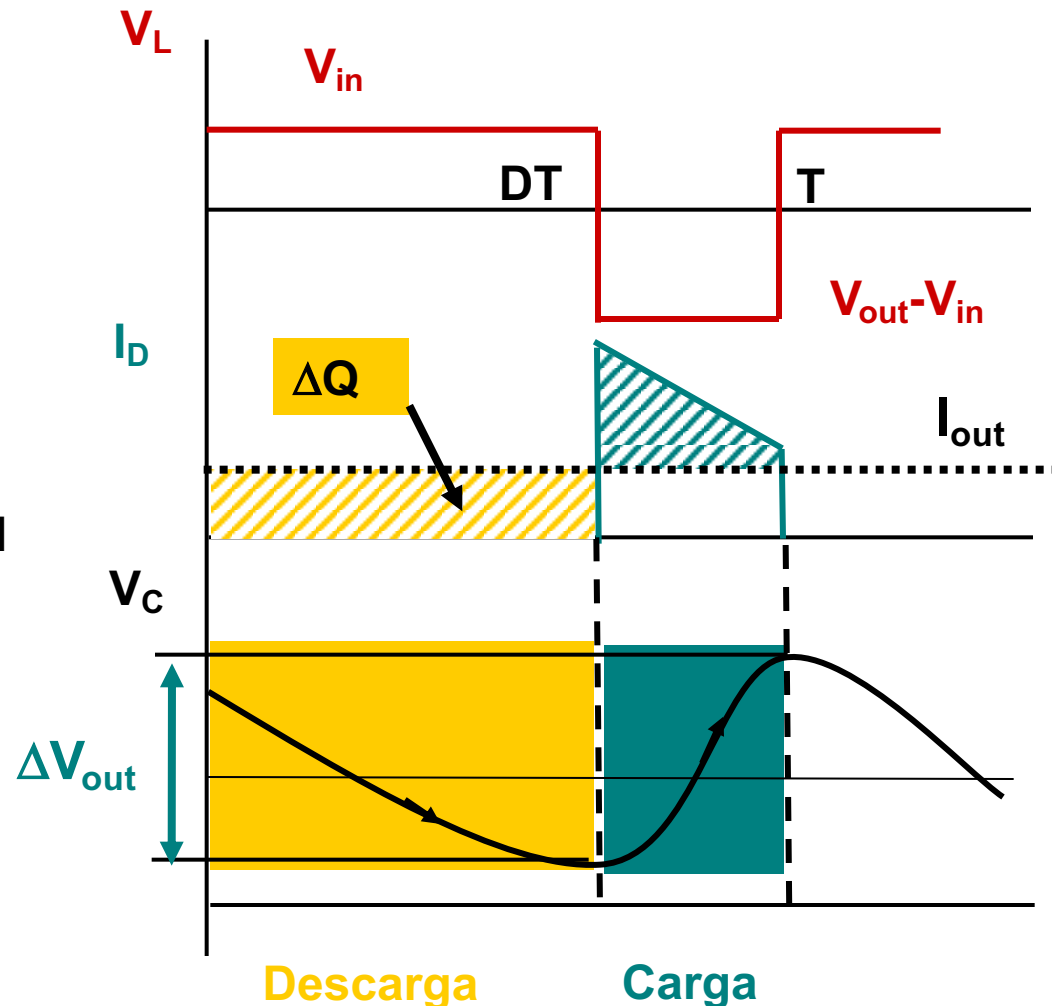
En este caso resulta más fácil basarse en la descarga (área amarilla):

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



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

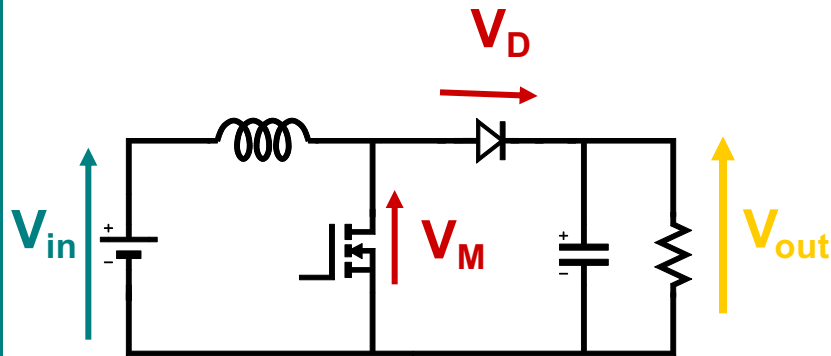
## Formas de onda



Conocido el valor de  $L$  y tomando como dato  $\Delta V_{\text{out}}$  podemos calcular  $C$

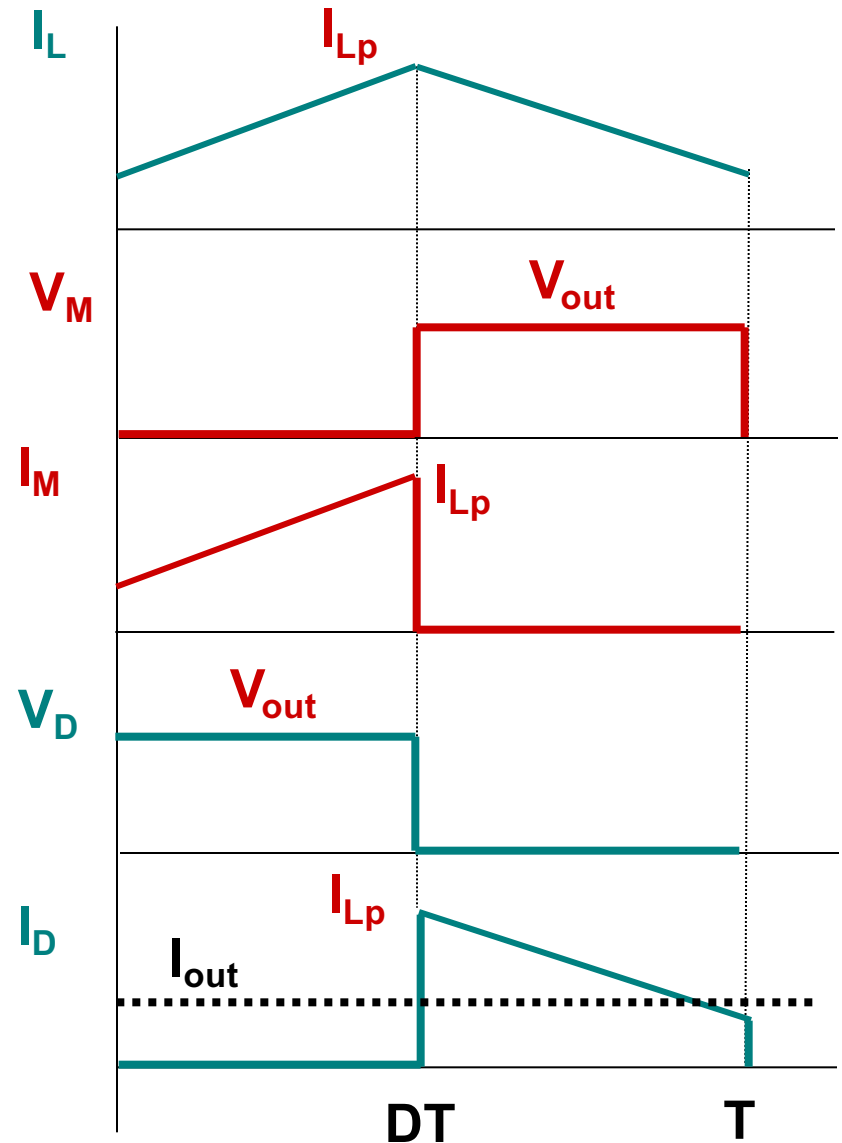
# Esfuerzos en los semiconductores

## Convertidor Elevador en MCC



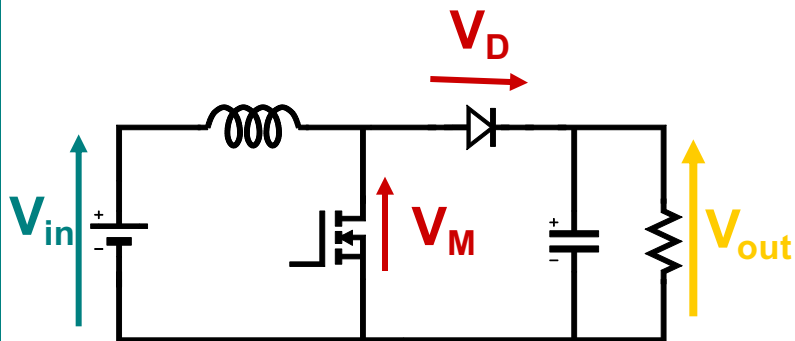
$$V_M = V_{out}$$

$$V_D = V_{out}$$



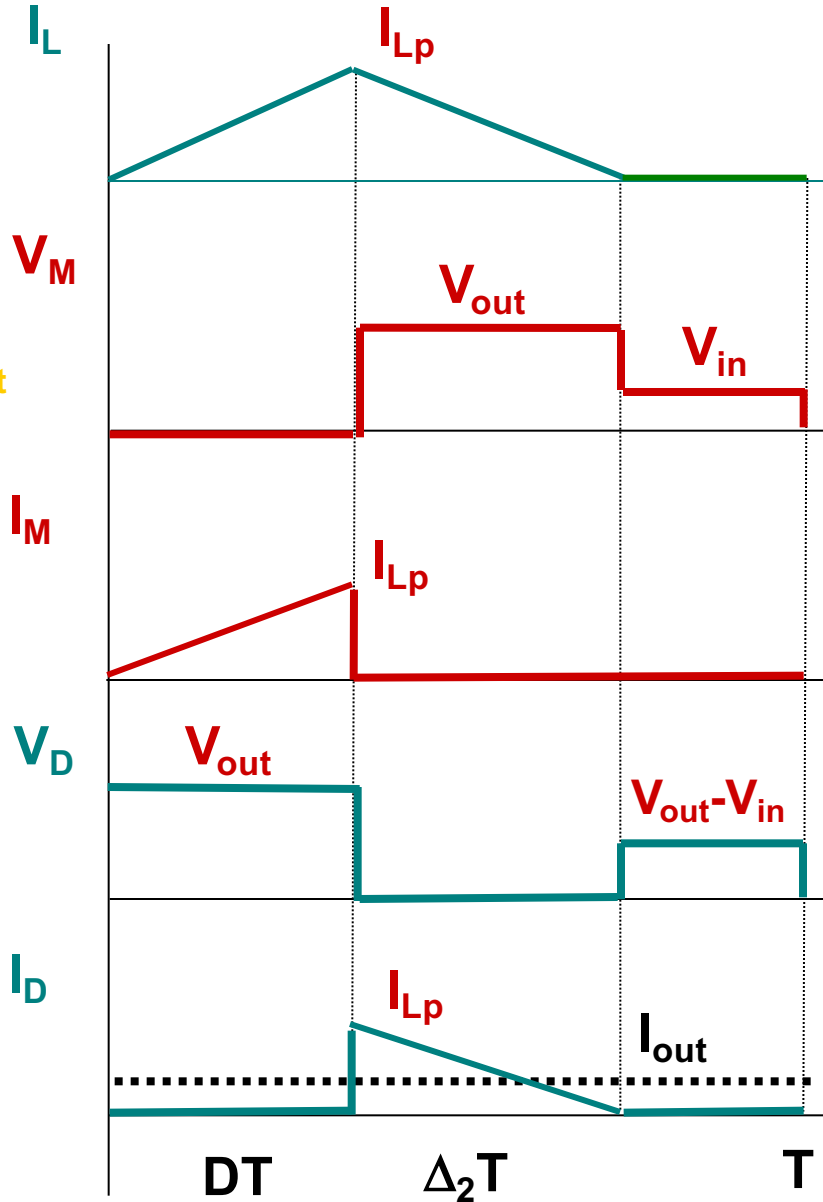
# Esfuerzos en los semiconductores

## Convertidor Elevador en MCD



$$V_M = V_{out}$$

$$V_D = V_{out}$$



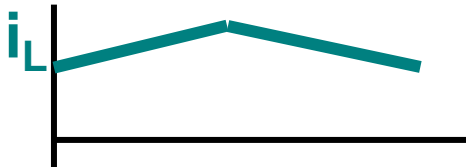
# El convertidor ELEVADOR

$$V_{in} < V_{out}$$

Idealmente sin pérdidas

2 modos de funcionamiento

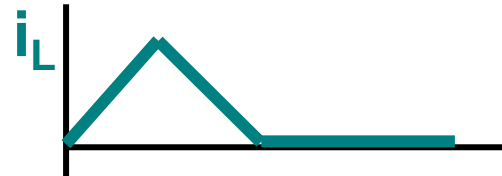
MCC



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

- D Independiente de la carga
- Valores de L altos
- Corrientes pequeñas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$

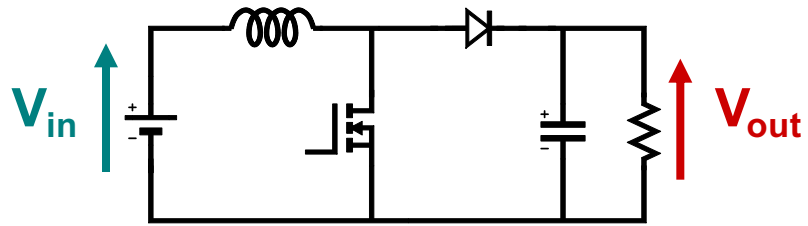
MCD



$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T} \cdot \left(1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}\right)}$$

- D Depende de la carga
- Valores de L bajos
- Corrientes elevadas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$

- Cálculo de bobina y condensador
- Aplicaciones



## El convertidor elevador tiene un gran número de usos industriales

- **Sistemas de potencias  $> 1\text{kW}$**
- **Tensión de entrada universal**
- **Corrección del Factor de Potencia**

**Es, junto con el reductor, uno de los convertidores más usados**

**Sus principales ventajas son:**

- **Sencillez**
- **Robustez**
- **Rendimiento muy elevado (puede ser superior al 96%)**
- **Trabaja bien con rangos de tensión amplios**

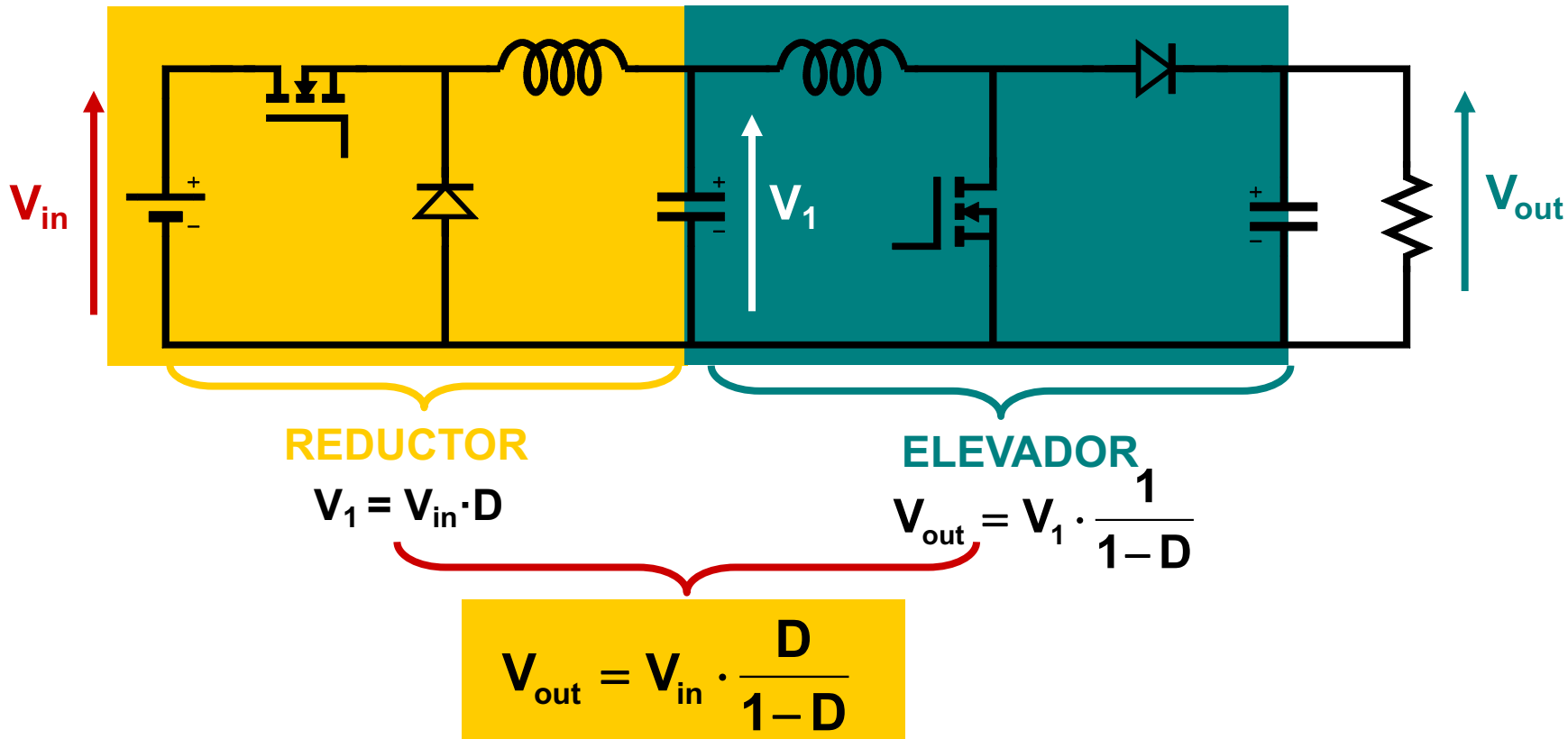
Su mayor **inconveniente** es que, si la tensión de entrada es elevada, la tensión de salida será muy alta

Convertidor Reductor-Elevador (*Buck-Boost*)Reductor:  $V_{out} < V_{in}$ Elevador:  $V_{out} > V_{in}$ 

¿Es posible elevar y reducir con un convertidor?



Posible solución: conectar un reductor y un elevador en cascada





## Convertidor Reductor-Elevador

La tensión de salida con este sistema es:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \cdot \frac{D}{1-D}$$

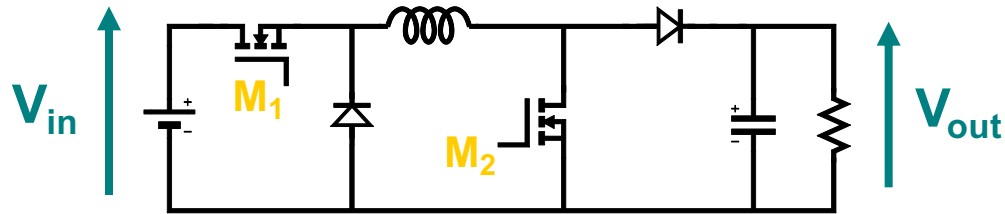
- Si  $D < 0.5$  la tensión de salida es menor que la de entrada.
- Si  $D > 0.5$  la tensión de salida es mayor que la de entrada.

### Inconveniente

El convertidor tiene el doble de componentes que los convertidores en los que se basa

¿Es posible obtener el mismo resultado sin aumentar el número de componentes?

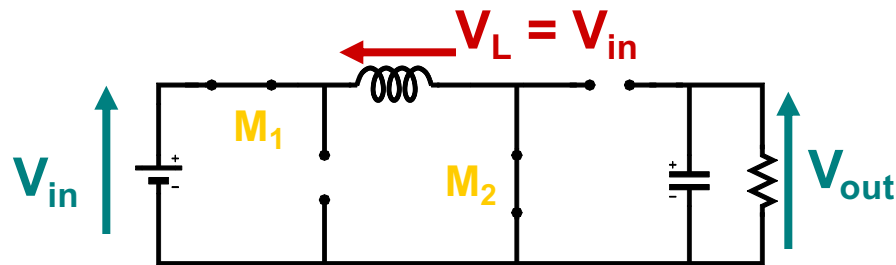
El condensador intermedio lo podemos eliminar y unir las dos bobinas.



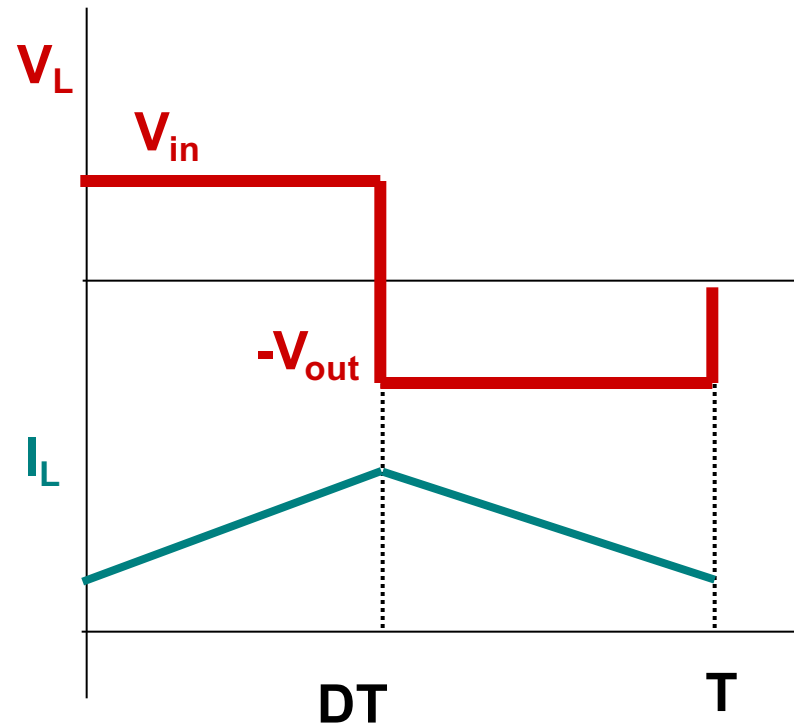
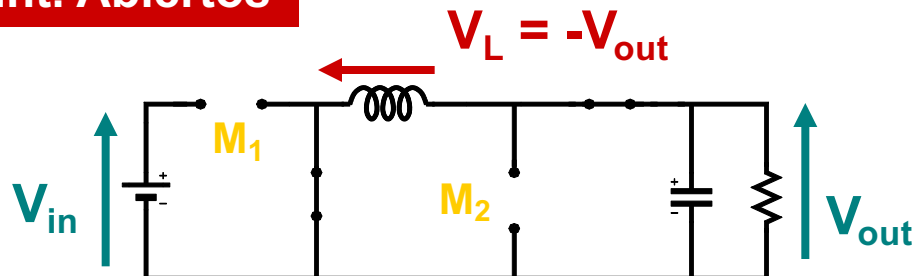
Mismo ciclo de trabajo para los dos convertidores

Los dos interruptores se manejan simultáneamente

Int. Cerrados



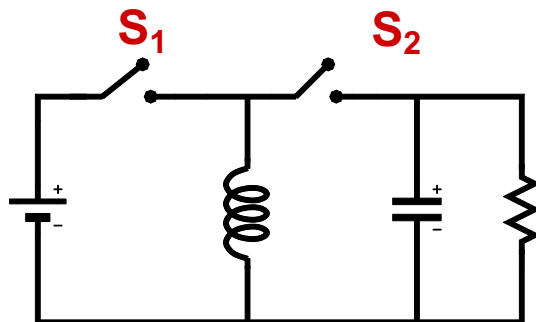
Int. Abiertos



- Durante D, la bobina queda en paralelo con la entrada
- Durante (1-D), la bobina queda en paralelo con la salida

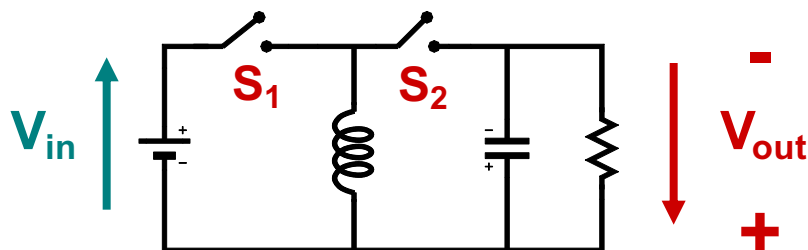
$$V_{in} \cdot D = V_{out}(1-D) \quad \rightarrow \quad V_{out} = V_{in} \cdot \frac{D}{1-D}$$

Por tanto, para conseguir el mismo comportamiento debemos encontrar un circuito que maneje la bobina de una forma similar:



- Cerrando  $S_1$  ponemos la bobina en paralelo con la entrada
- Cerrando  $S_2$  la ponemos en paralelo con la salida.

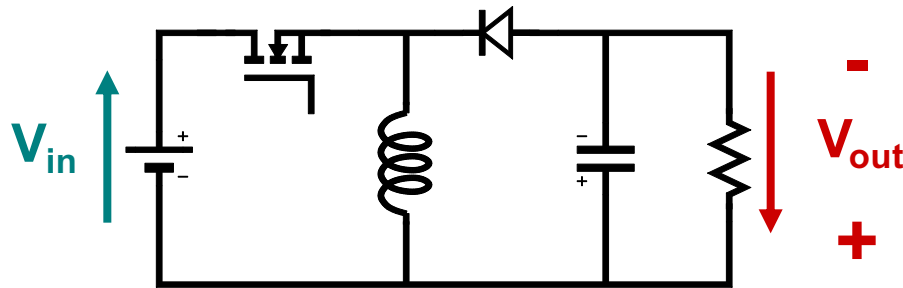
Para desmagnetizar bobina debemos invertir la tensión de salida



- Un transistor
- Un diodo
- Una bobina
- Un condensador



**Convertidor Reductor-Elevador**



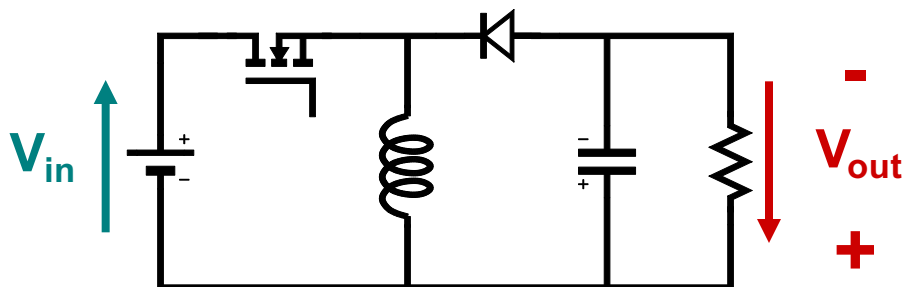
**Integración de los dos convertidores en uno sólo**



**Es necesario invertir la tensión de salida**

- La tensión de salida puede ser mayor o menor que la de entrada.
- La tensión de salida está invertida respecto a la tensión de entrada.

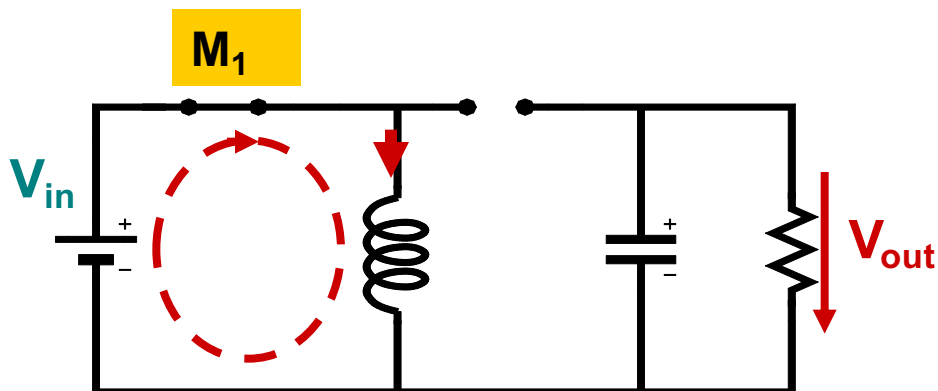
## Relación de transformación en MCC



## 2 estados de funcionamiento en MCC

1

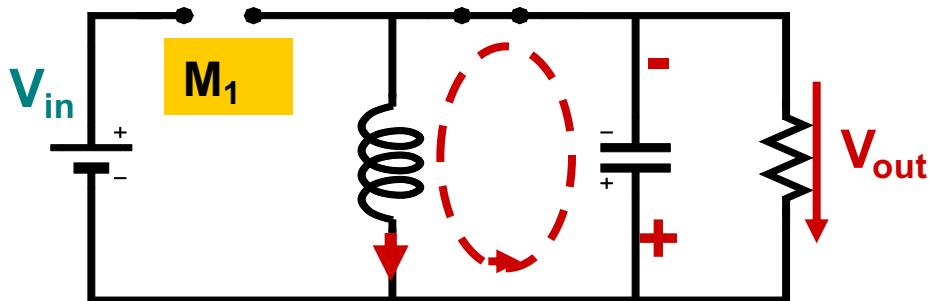
**Interruptor  
cerrado**



Carga de la bobina

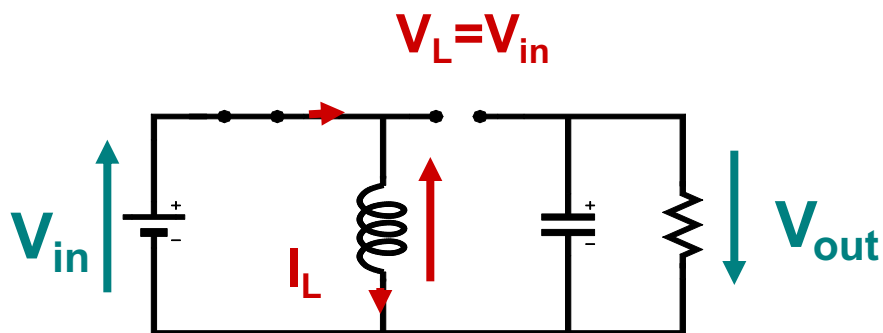
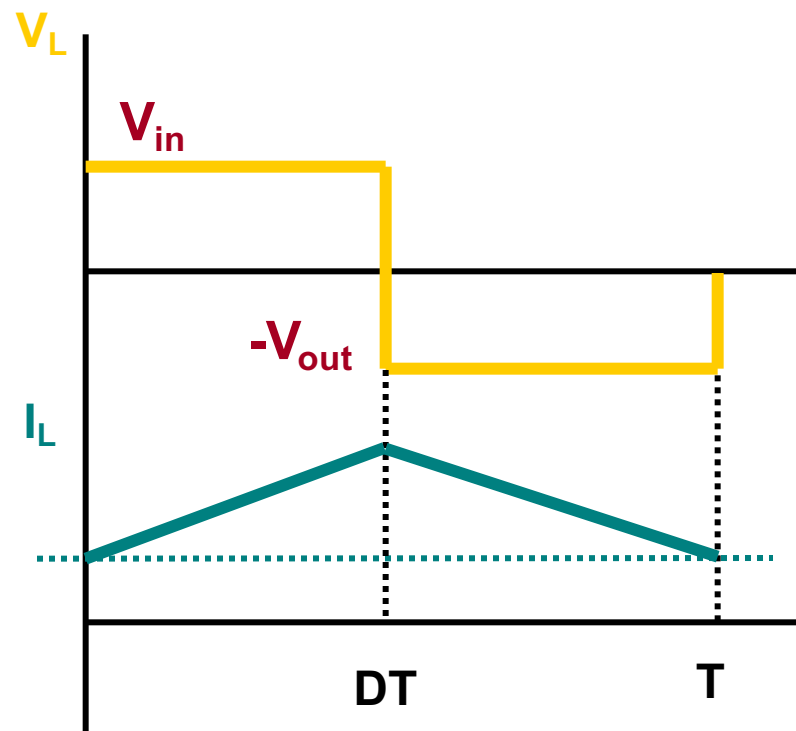
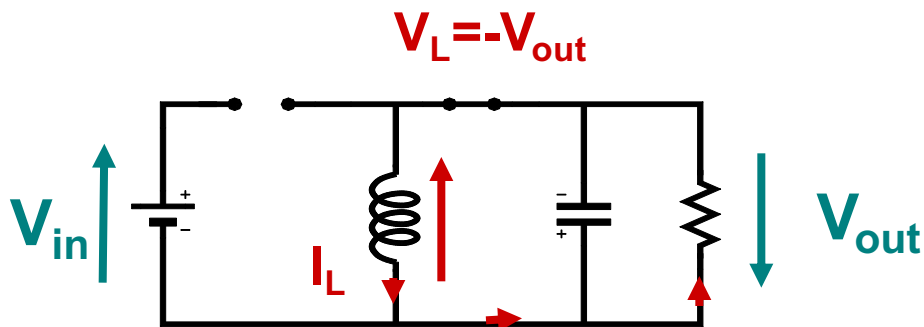
2

**Interruptor  
abierto**



Descarga de la bobina

## Formas de onda en MCC

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

La tensión media en la bobina debe ser nula:

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



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

La tensión de salida está invertida respecto a la de entrada

## 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:

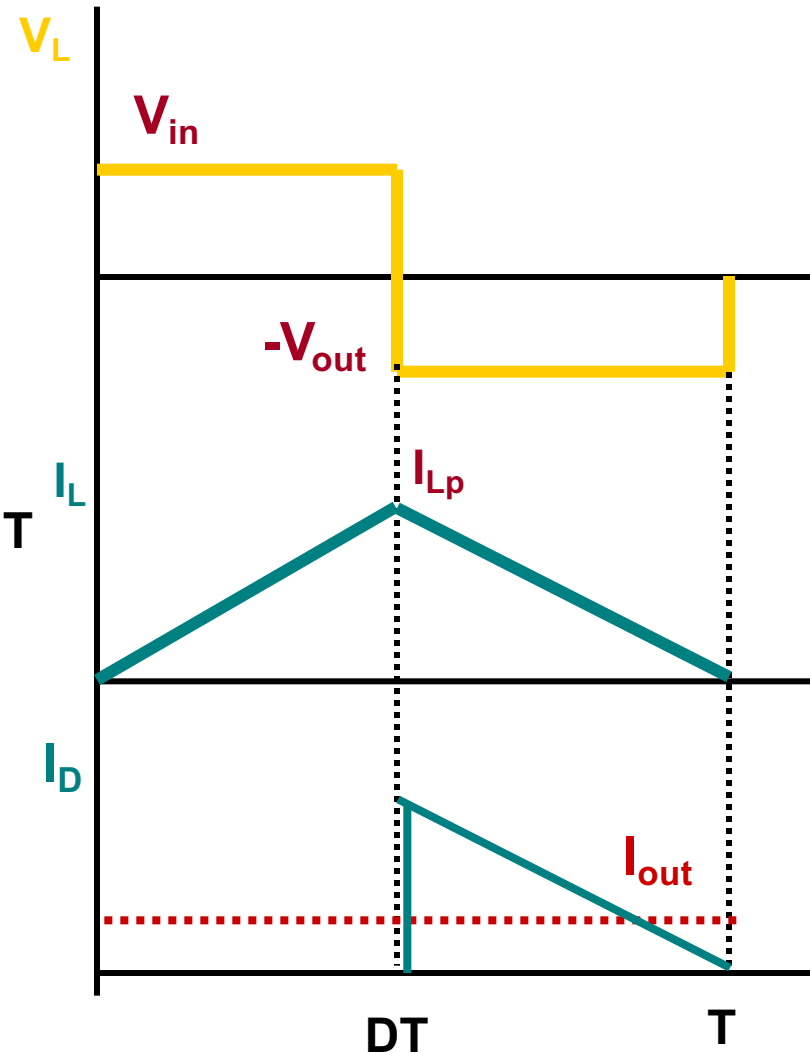
$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

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

$$I_{out} = \bar{I}_D = \frac{1}{2} I_{Lp} \cdot (1-D) = \frac{1}{2L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot (1-D) \cdot T$$

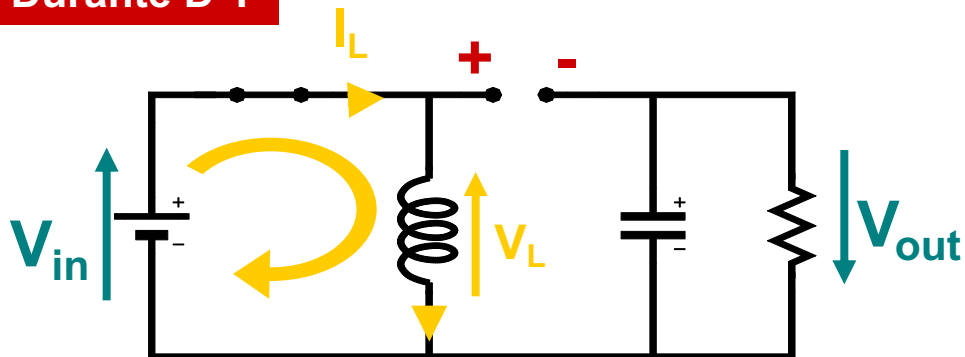
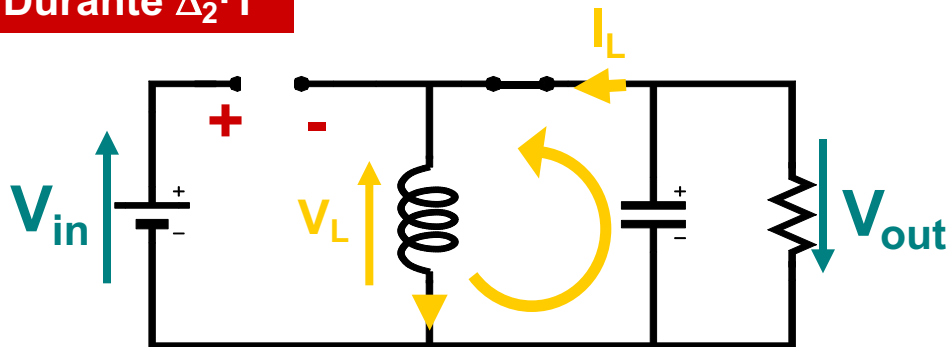
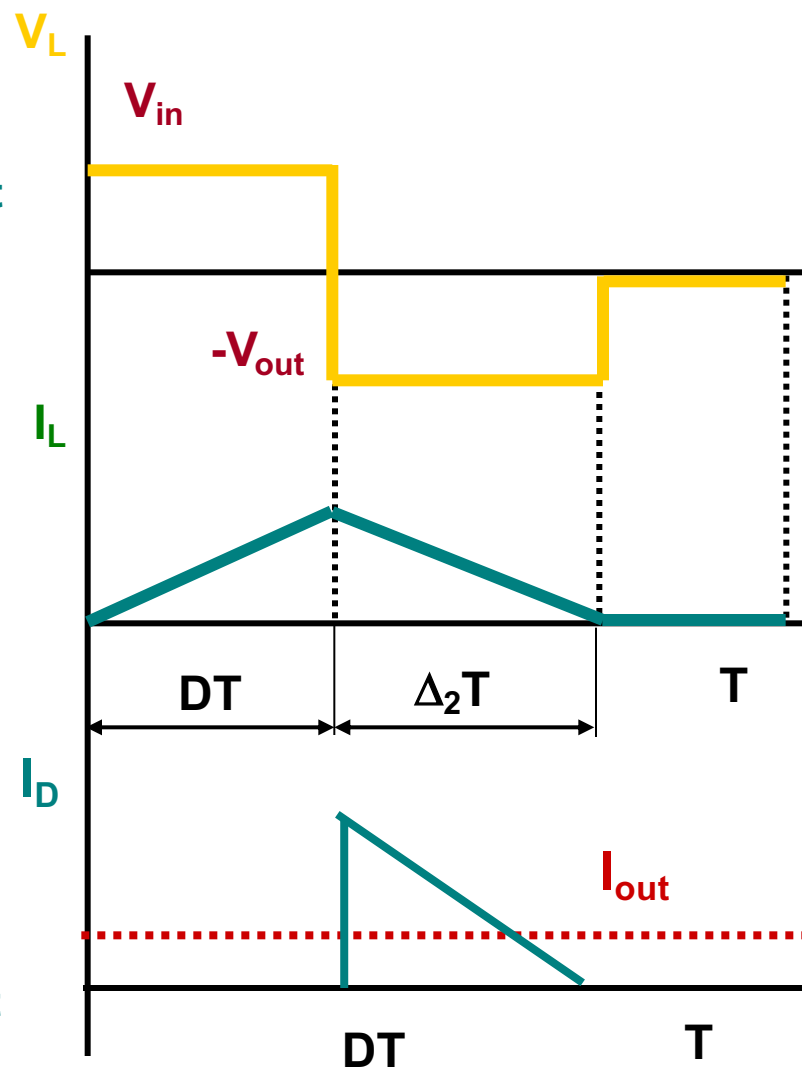
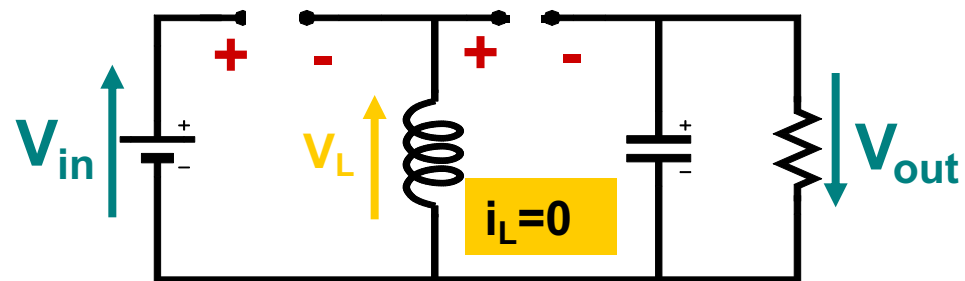
Se cumple:  $V_{out} = V_{in} \cdot \frac{D}{1-D}$

Por tanto: 
$$L_{LIM} = \frac{V_{out} \cdot T}{2 \cdot I_{out}} \cdot (1-D)^2$$



## Operación en MCD

Hay 3 estados de funcionamiento

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:

$$V_{in} \cdot D = V_{out} \cdot \Delta_2$$

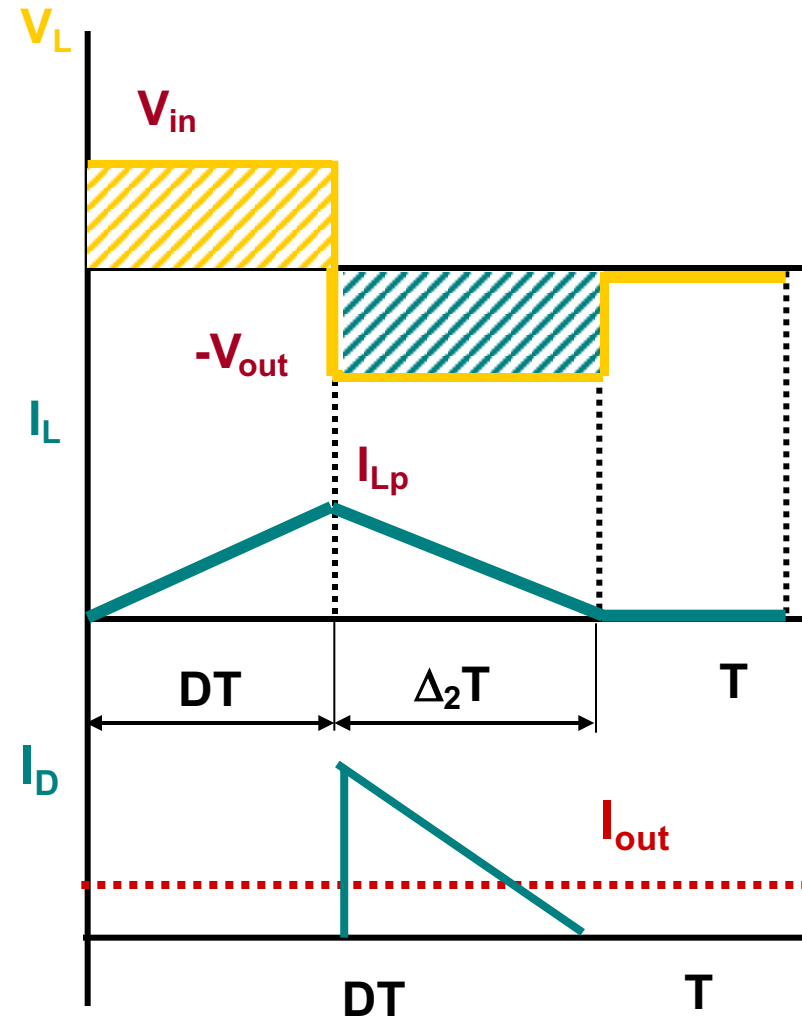
La corriente de pico es:

$$I_{Lp} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} \cdot D \cdot T$$

La corriente media de salida es:

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_{Lp} \cdot \Delta_2 \quad I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T}}$$



$R_L$  es la carga de salida

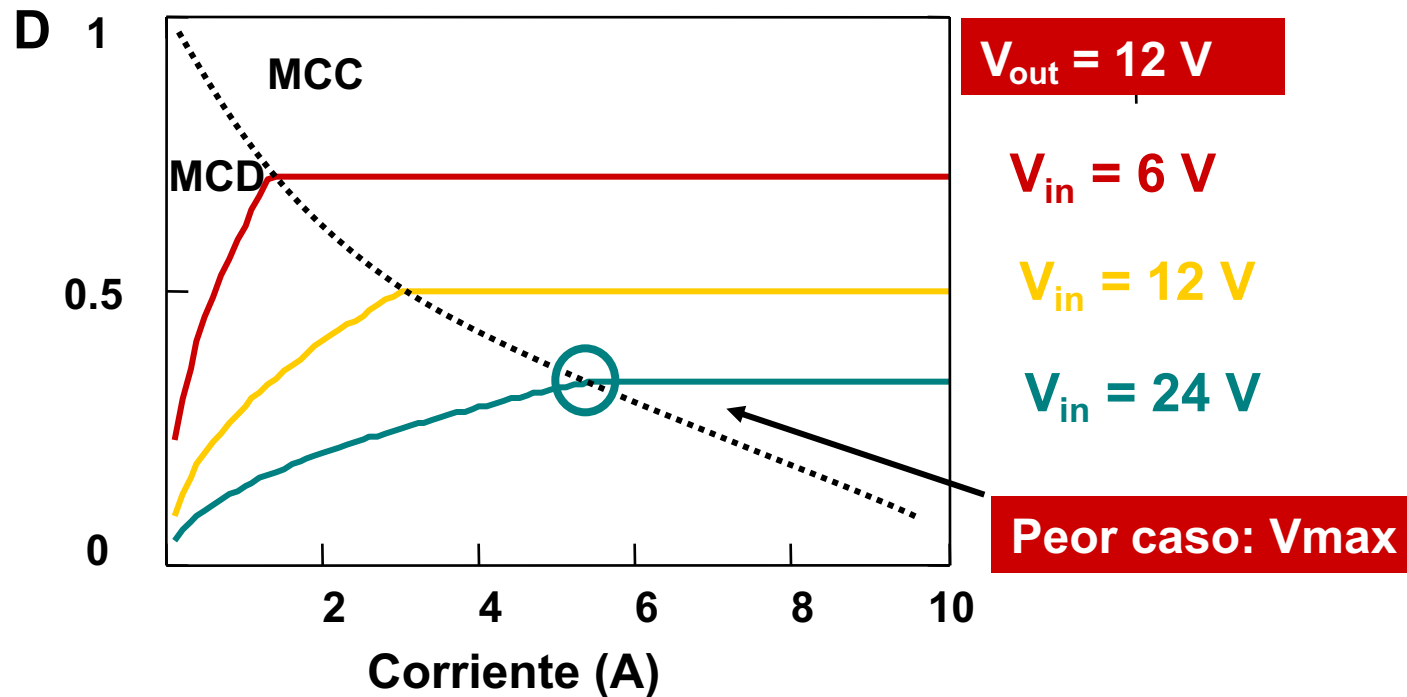
## Operación en MCD

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

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

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



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

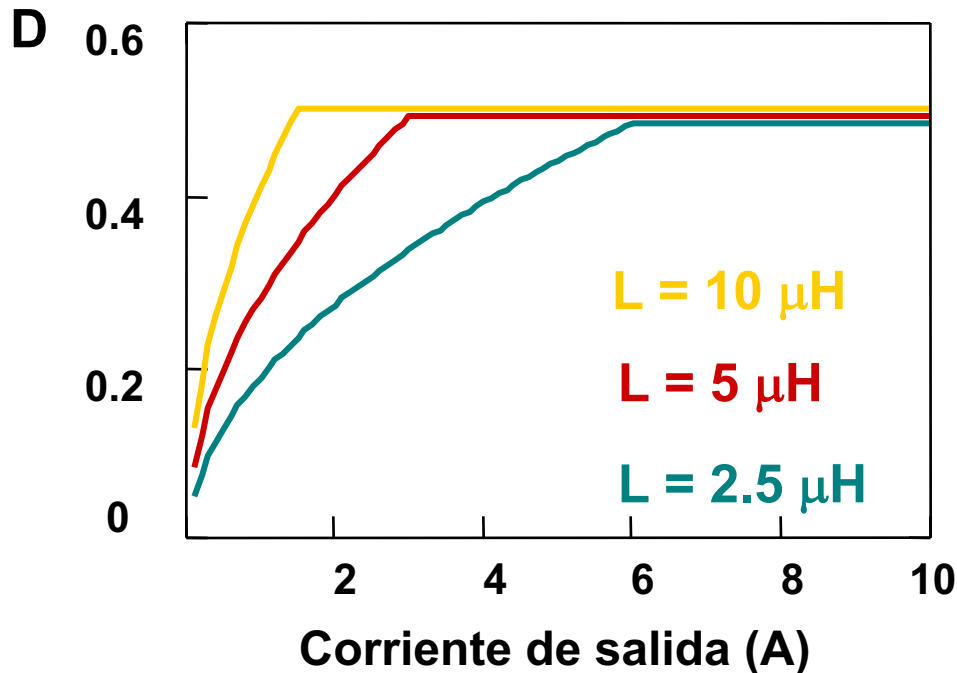
$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T}}$$

$R_L$ : 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



$$V_{in} = 12 \text{ V}$$

$$V_{out} = 12 \text{ V}$$

$$L = 10 \mu\text{H}$$

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

$$L = 2.5 \mu\text{H}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \sqrt{\frac{2L}{R_L T}}$$

## Cálculo del condensador

El rizado pico-pico en el condensador será:

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

En régimen permanente:

Carga = Descarga

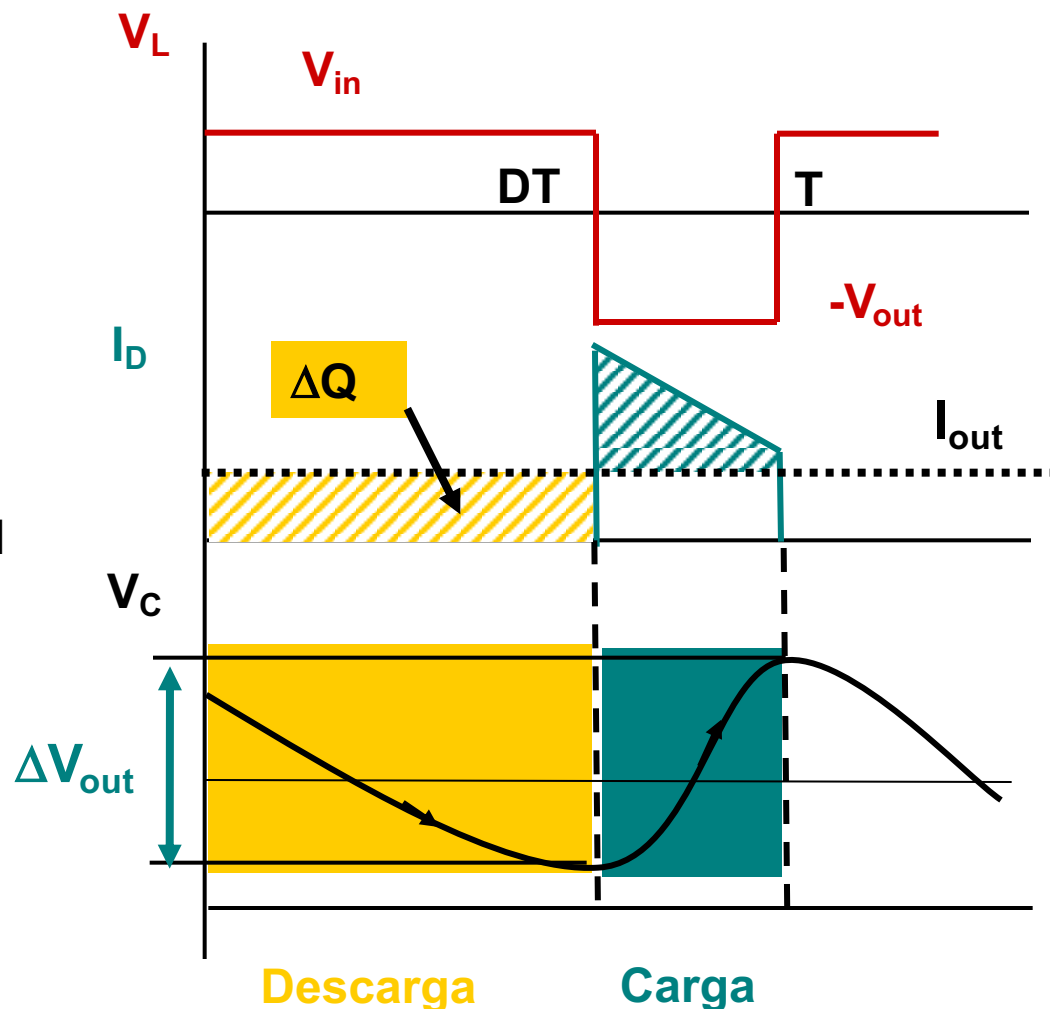
En este caso resulta más fácil basarse en la descarga (área amarilla):

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



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

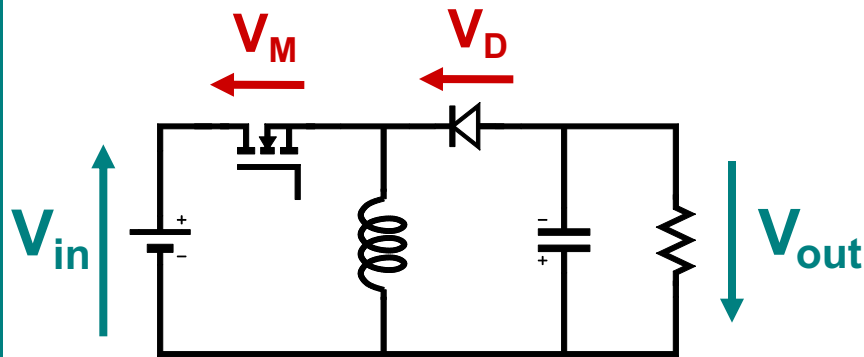
## Formas de onda



Conocido el valor de  $L$  y tomando como dato  $\Delta V_{\text{out}}$  podemos calcular  $C$

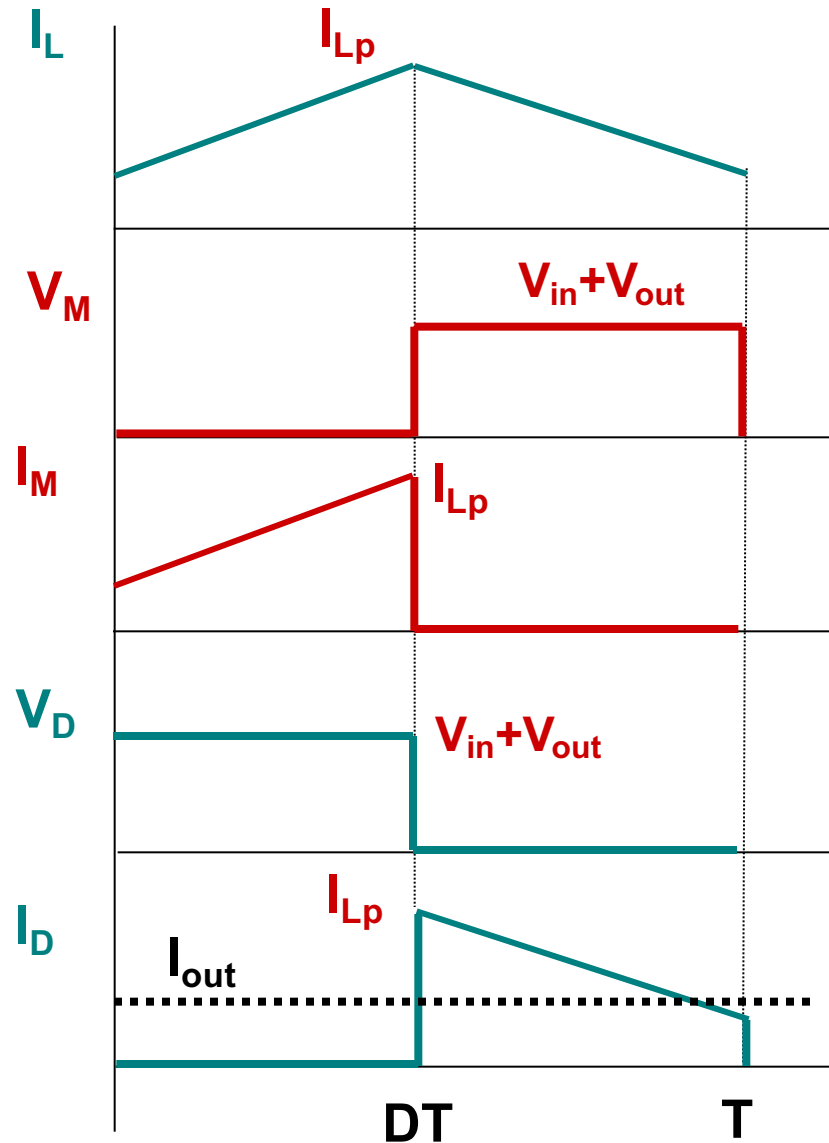
# Esfuerzos en los semiconductores

## Convertidor Reductor-Elevador en MCC



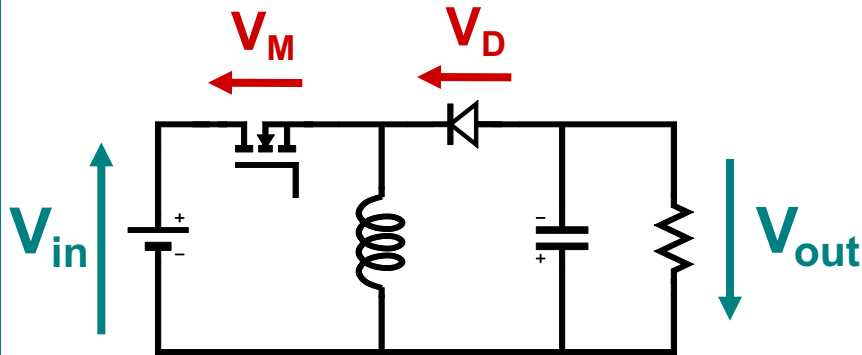
$$V_{Mmax} = V_{in} + V_{out}$$

$$V_{Dmax} = V_{in} + V_{out}$$



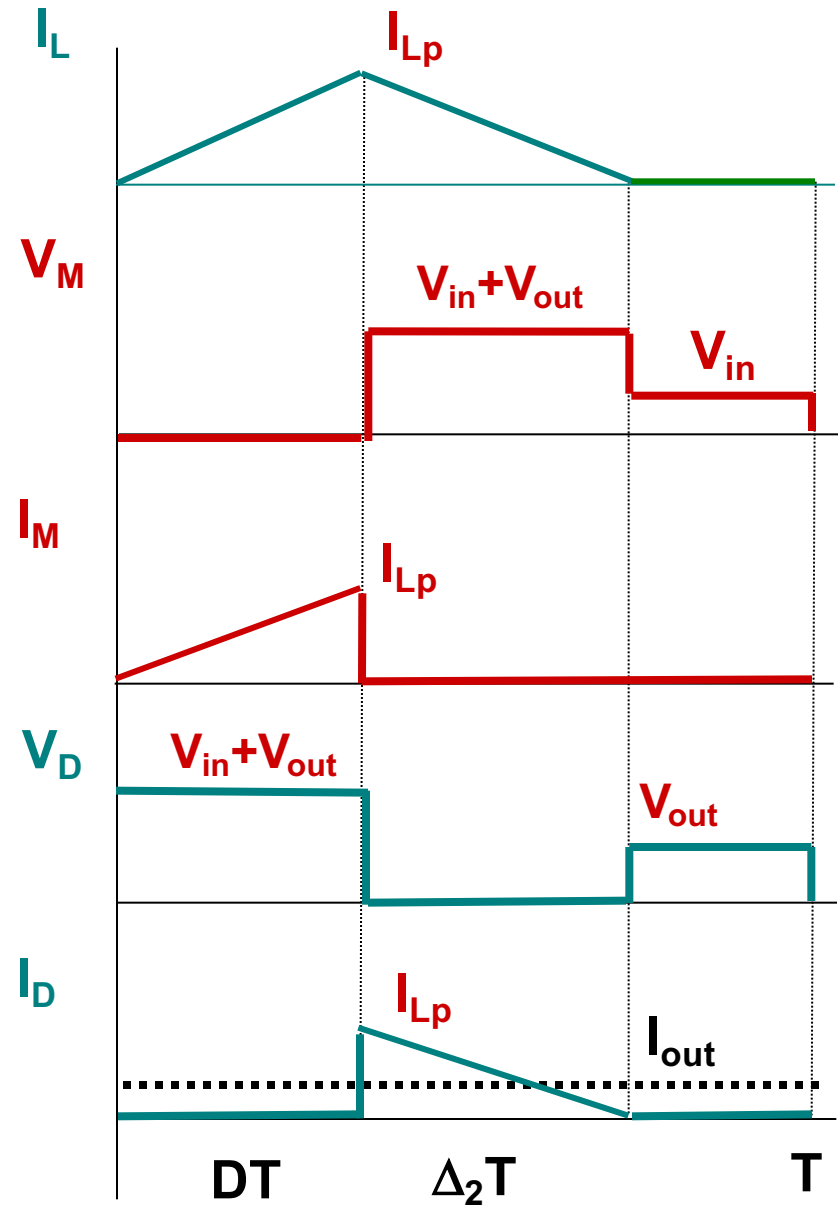
# Esfuerzos en los semiconductores

## Convertidor Reductor-Elevador en MCD



$$V_{Mmax} = V_{in} + V_{out}$$

$$V_{Dmax} = V_{in} + V_{out}$$

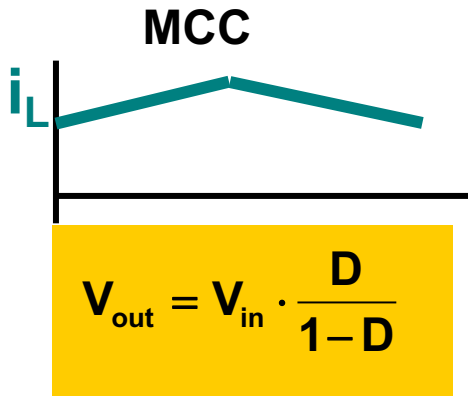


# El convertidor REDUCTOR-ELEVADOR

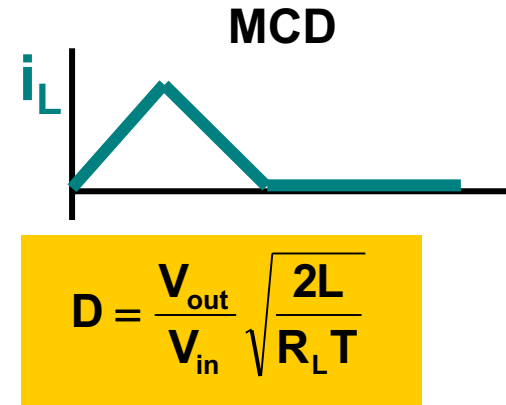
$$V_{out} > V_{in} > V_{out}$$

Tensión de salida invertida

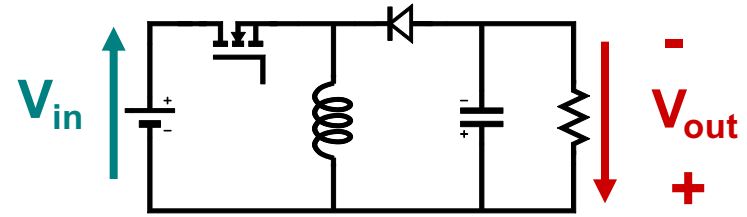
2 modos de funcionamiento



- D Independiente de la carga
- Valores de L altos
- Corrientes pequeñas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$



- D Depende de la carga
- Valores de L bajos
- Corrientes elevadas
- $V_{Mmax} = V_{in}$
- $V_{Dmax} = V_{in}$



- Cálculo de bobina y condensador
- Aplicaciones

## COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS

La elección de una topología u otra va mucho más allá de una simple cuestión de magnitudes de tensión de entrada y de tensión de salida. Los convertidores tienen comportamientos reales distintos: unos son más robustos, otros tienen mejor rendimiento, son más sencillos de construir, etc.

	Reductor	Elevador	Reductor-Elevador
$V_{\text{MOSFET}}$	$V_{\text{in}}$	$V_{\text{out}}$	$V_{\text{in}} + V_{\text{out}}$
$I_{\text{PMOS}}$	$I_0$	$I_0/(1-D)$	$I_0/(1-D)$
$V_{\text{DIODO}}$	$V_{\text{in}}$	$V_{\text{out}}$	$V_{\text{in}} + V_{\text{out}}$
$I_{\text{PDIODO}}$	$I_0$	$I_0/(1-D)$	$I_0/(1-D)$

El rizado de corriente se ha supuesto nulo.



## Ejemplo de comparación:

## Especificaciones:

$V_{in} = 48 \text{ V}$

$P_{max} = 100 \text{ W}$

$\Delta V_0 = 2\%$

$V_{out} = 12 \text{ V}$

$L = 50 \mu\text{H}$

	$V_{MOSFET}$	$V_{DIODO}$	$I_{Pico}$	$\Delta i_L$	$C$
Reductor	48 V	48 V	10.1 A	3.6 A	9.4 $\mu\text{F}$
Reductor-Elevador	60 V	60 V	12.2 A	7.7 A	277 $\mu\text{F}$

## Especificaciones:

$V_{in} = 12 \text{ V}$

$P_{max} = 100 \text{ W}$

$\Delta V_0 = 2\%$

$V_{out} = 48 \text{ V}$

$L = 50 \mu\text{H}$

	$V_{MOSFET}$	$V_{DIODO}$	$I_{Pico}$	$\Delta i_L$	$C$
Elevador	48 V	48 V	9.2 A	1.8 A	16.2 $\mu\text{F}$
Reductor-Elevador	60 V	60 V	11.4 A	1.9 A	17.3 $\mu\text{F}$

## Comparación de topologías:

Peor comportamiento



Reductor - Elevador

- Mayores esfuerzos en los semiconductores
- Mayor tamaño de los elementos pasivos

Por tanto, el precio que se paga por poder reducir y elevar la tensión con la misma topología es bastante elevado.

Otras cuestiones **importantes** a tener en cuenta:

- Transistores no referidos a masa: necesidad de drivers más complejos
- Tamaño de los componentes pasivos: condensadores y bobinas
- Corriente de entrada: si está troceada se necesitarán filtros más grandes.

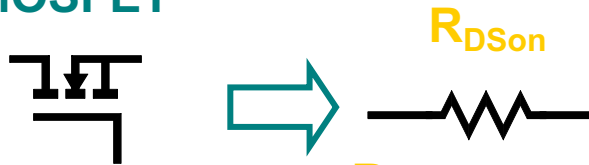
## No idealidades en el convertidor

Hasta ahora se ha supuesto que todos los componentes eran ideales.  
Los componentes reales provocan comportamientos un poco distintos

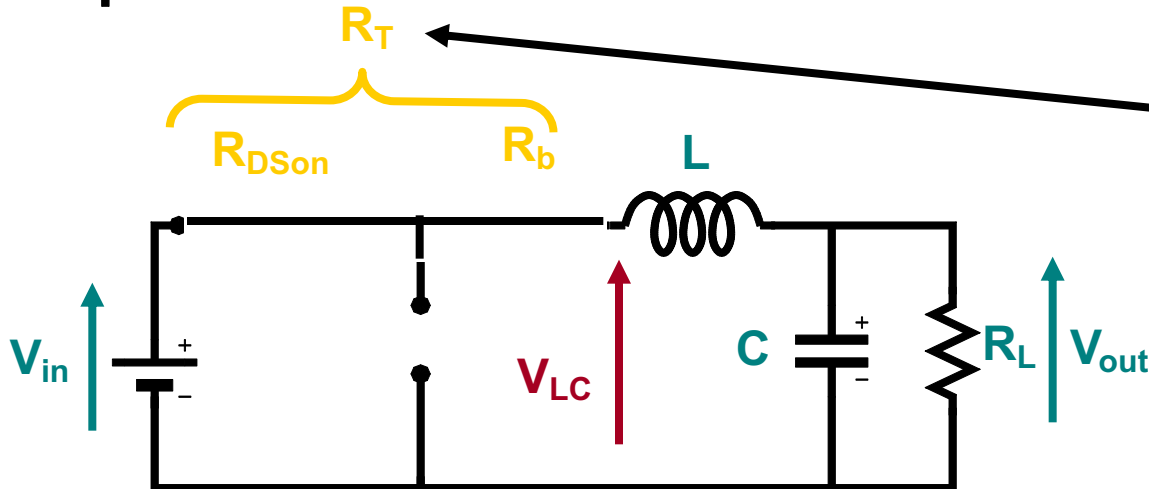
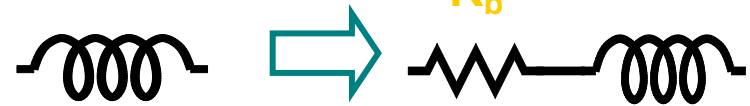
- Componentes reales
- Trazado de las pistas del circuito

### Efecto de la impedancia de los componentes

MOSFET



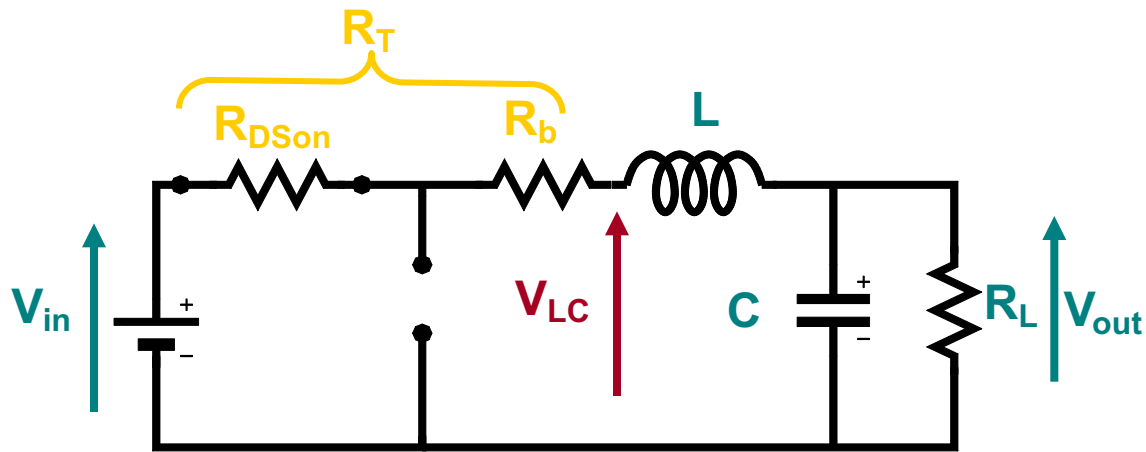
Bobina



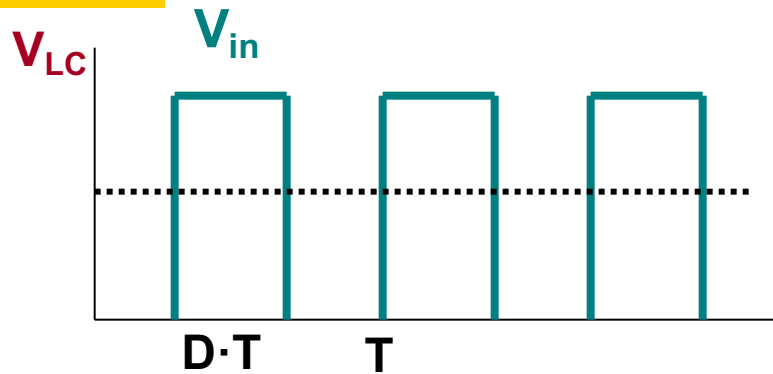
En esta impedancia caerá tensión.

Al filtro LC ideal no le llega toda la tensión de entrada

# EL CONVERTIDOR REDUCTOR REAL



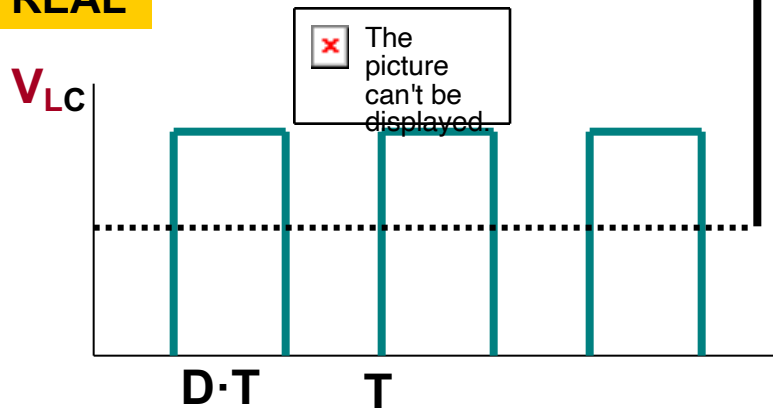
## IDEAL



$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

$$V_{out} = V_{in} \cdot D \cdot \frac{R_L}{R_L + R_T}$$

## REAL



Si  $R_L \gg R_T$  apenas hay diferencia

Si  $R_L \approx R_T$  el ciclo de trabajo será muy distinto

En todo caso,  $D_{real} > D_{ideal}$

## Ejemplo

$$V_{in} = 12 \text{ V}$$

$$R_{DSon} = 50 \text{ m}\Omega$$

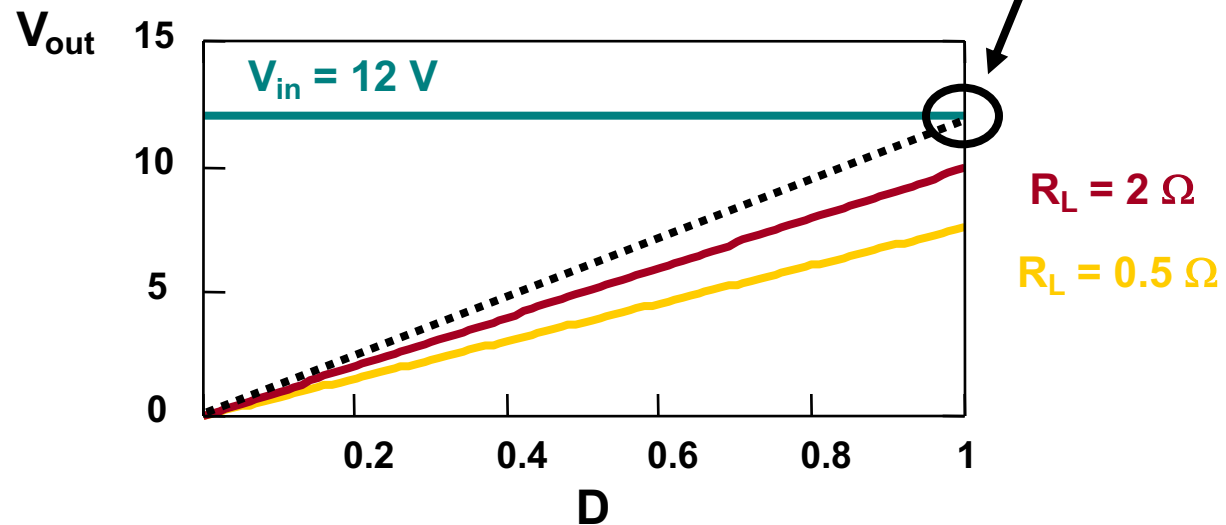
$$R_b = 50 \text{ m}\Omega$$



Idealmente, si  $D = 1$ :

$$V_{out} = V_{in} \cdot D$$

$$V_{out} = V_{in} = 12$$

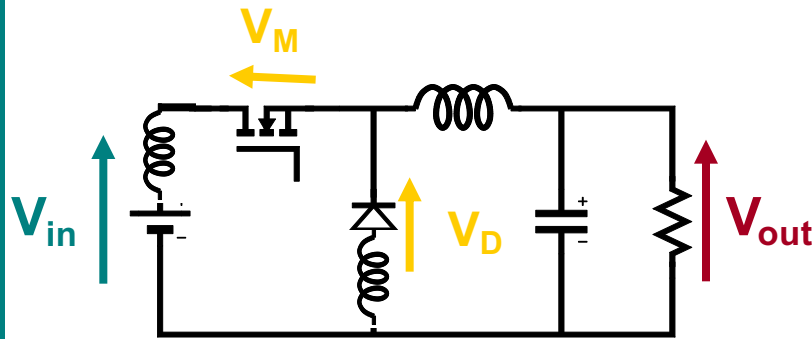


Con  $D = 1$  no llegamos a obtener la tensión de salida igual a la de entrada  
Cuanto más carga, más ciclo de trabajo se necesita para obtener la misma tensión de salida.

## No idealidades: Formas de onda reales

En la práctica, las formas de onda reales no son perfectamente cuadradas como las que hemos visto.

La presencia de capacidades parásitas en los componentes y de inductancias parásitas en las conexiones y el layout del circuito hacen que se produzcan resonancias en las formas de onda.



### Forma de onda real

