

TEMA 15. CONVERTIDORES DC/DC II

15.1 INTRODUCCIÓN

15.2 CONVERTIDOR PUENTE

15.2.1 Estrategias de Control

15.2.1.1 Control Bipolar

15.2.1.2 Control Unipolar

15.3 CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO

15.3.1 Convertidor Flyback

15.3.2 Convertidor Forward

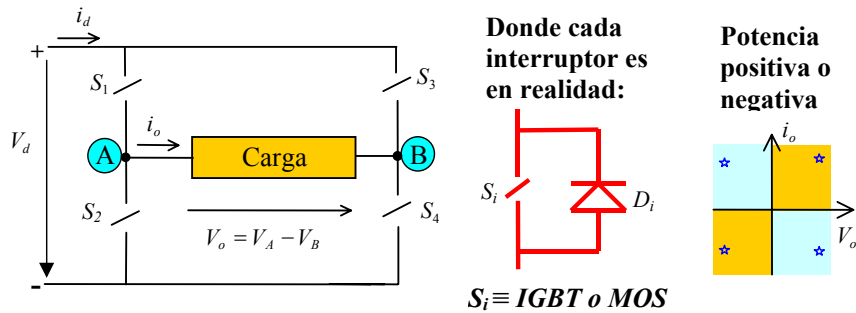
15.3.3 Convertidor Puente

15.4 CIRCUITOS DE CONTROL DE CONVERTIDORES

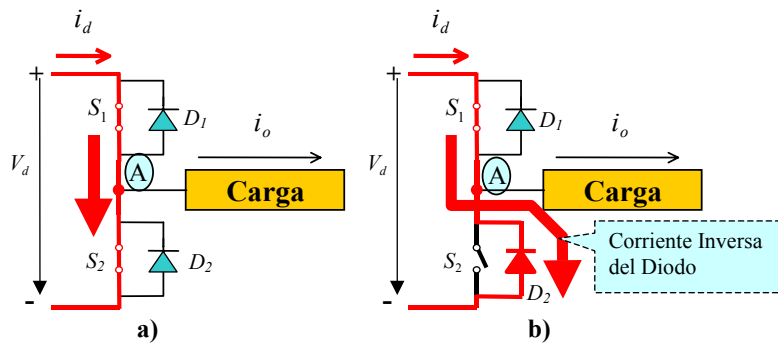
INTRODUCCIÓN

- **Objetivo:** Estudio de los circuitos más usados en las fuentes de alimentación reguladas (de amplio uso en la alimentación de equipos electrónicos).
- **Características:**
 - ◆ Regulación de la tensión de salida a un valor V_o constante (dentro de un rango de tensiones de entrada y corrientes de salida).
 - ◆ **Aislamiento galvánico** entre entrada y salida, sin emplear transformadores de 50Hz.
 - ◆ Permitir si se precisa **más de una tensión de salida** aisladas entre sí.
- En este tema sólo se va a analizar el funcionamiento en modo de **conducción continua** (en las fuentes de alimentación L suele ser de un valor bastante grande).
- Se va a suponer que V_o es constante (C se supone de un valor elevado).

CONVERTIDOR PUENTE



Esquema del convertidor Puente (4 cuadrantes)

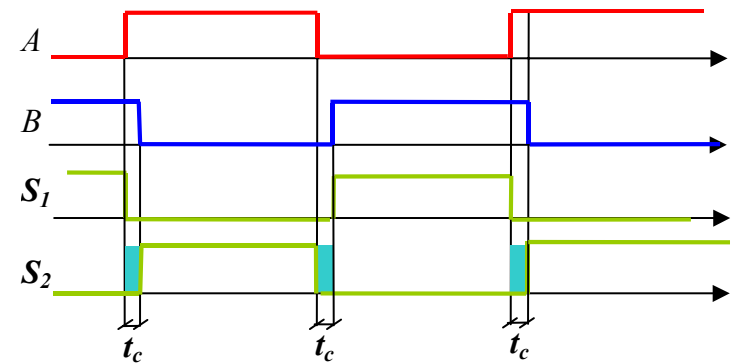
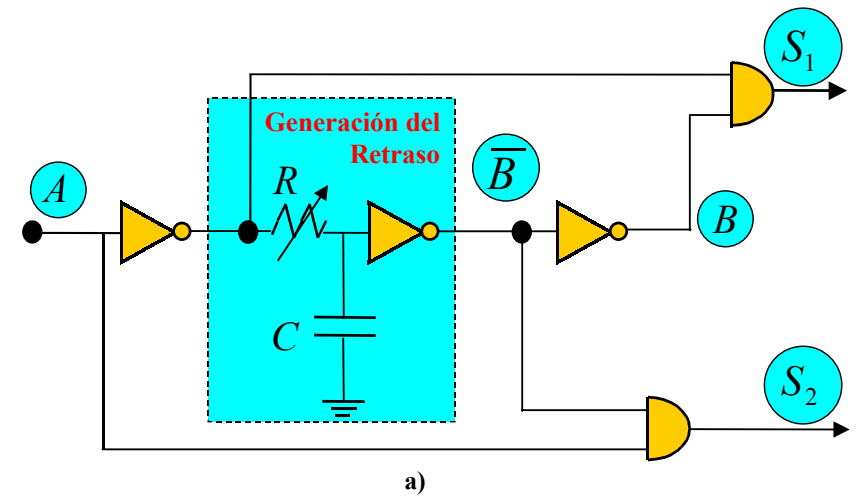


Convertidor Puente, problemas en el disparo de los interruptores:

- No se pueden cerrar simultáneamente los dos interruptores de una rama. Por tanto, si estaba conduciendo S_1 hay que esperar un tiempo mayor que el que necesita S_2 para cortarse antes de dar la orden de cierre a S_1 . \Rightarrow Empleo de **tiempos muertos** en el disparo de los interruptores.
- Cuando está conduciendo D_2 hay que controlar la velocidad de entrada en conducción de S_1 (controlando la velocidad de subida de V_{GS1}) de forma que la corriente de recuperación inversa de D_2 no suba excesivamente.

Los dos casos presentados son solo ejemplos, por simetría se pueden encontrar otros ejemplos.

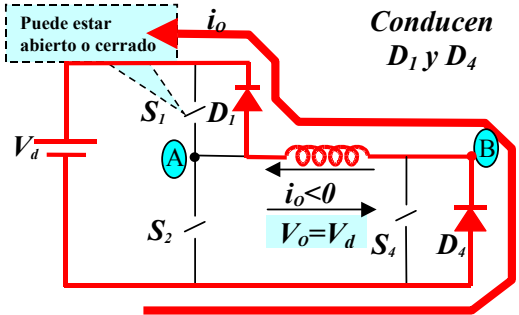
CONVERTIDOR PUENTE



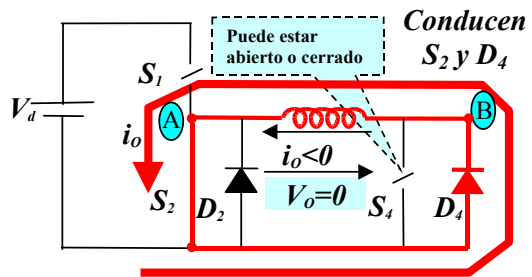
b)

Generación de Tiempos Muertos:
a) Circuito Simple para Generarlos. b) Formas de Ondas

CONVERTIDOR PUENTE



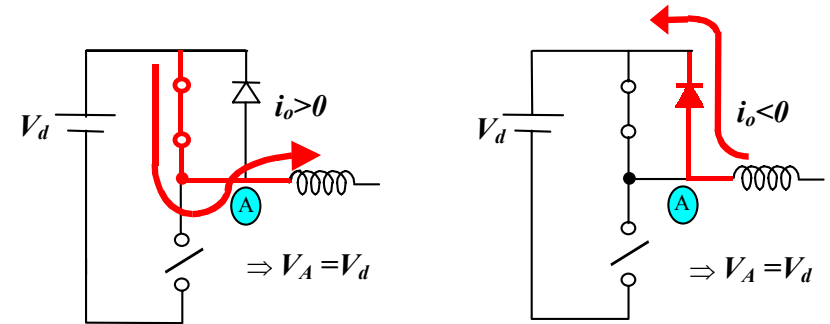
Circulación de Corriente por dos Diodos, se devuelve energía. (Si $i_o > 0$, se devuelve energía a la batería por los otros dos diodos).



Circulación de Corriente por dos Diodos aplicando una tensión nula. (Si $i_o > 0$, la corriente circularía por D_2 y S_4).

Estados Posibles													
$i_o > 0$							$i_o < 0$						
S_1	S_2	S_3	S_4	V_o	Conduce		S_1	S_2	S_3	S_4	V_o	Conduce	
0	0	0	0	$-V_d$	D_2	D_3	0	0	0	0	V_d	D_1	D_4
0	0	0	1	0	D_2	S_4	0	0	0	1	V_d	D_1	D_4
0	0	1	0	$-V_d$	D_2	D_3	0	0	1	0	0	D_1	S_3
0	1	0	0	$-V_d$	D_2	D_3	0	1	0	0	0	S_2	D_4
0	1	0	1	0	D_2	S_4	0	1	0	1	0	S_2	D_4
0	1	1	0	$-V_d$	D_2	D_3	0	1	1	0	$-V_d$	S_2	S_3
1	0	0	0	0	S_1	D_3	1	0	0	0	V_d	D_1	D_4
1	0	0	1	V_d	S_1	S_4	1	0	0	1	V_d	D_1	D_4
1	0	1	0	0	S_1	D_3	1	0	1	0	0	D_1	S_3

CONVERTIDOR PUENTE



Tensión V_A con S_1 Cerrado (S_2 Abierto) en los casos $i_o > 0$ e $i_o < 0$

$$\left. \begin{aligned} \text{Si } S_1 = \text{on} (S_2 = \text{off}) &\Rightarrow V_A = V_d \\ \text{Si } S_1 = \text{off} (S_2 = \text{on}) &\Rightarrow V_A = 0 \end{aligned} \right\}$$

Luego:
$$V_A = \frac{V_d \cdot t_{onA} + 0 \cdot t_{offA}}{T_S} = V_d \cdot D_A$$

Dónde: D_A es el "Duty cycle" de la rama A.

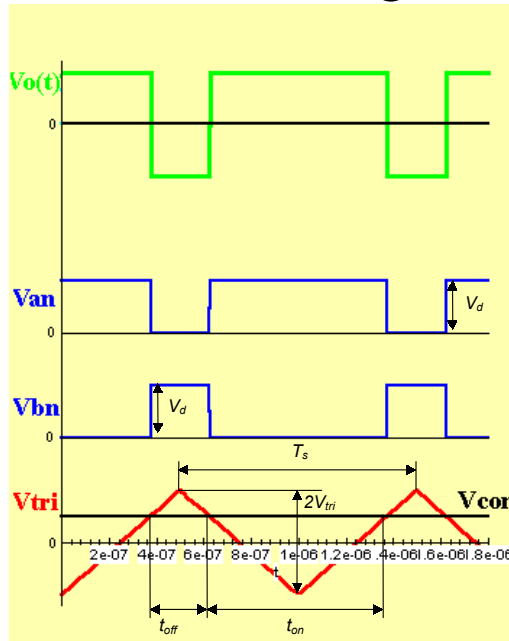
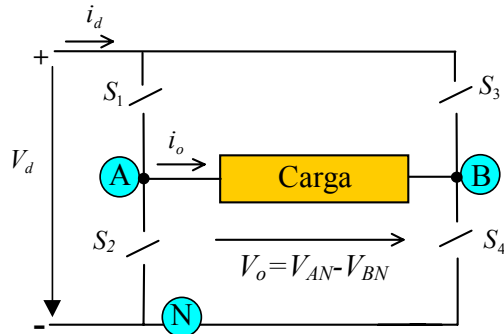
En la rama B se puede obtener de la misma forma: $V_B = V_d \cdot D_B$

Luego:
$$V_o = V_A - V_B = V_d(D_A - D_B)$$

Si los dos interruptores están abiertos:

$$\begin{aligned} V_A = V_d \text{ si } i_o < 0 \\ V_A = 0 \text{ si } i_o > 0 \end{aligned} \Rightarrow \text{No se puede controlar con } D_A \text{ la tensión de la rama}$$

CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



Convertidor Puente: Control Bipolar

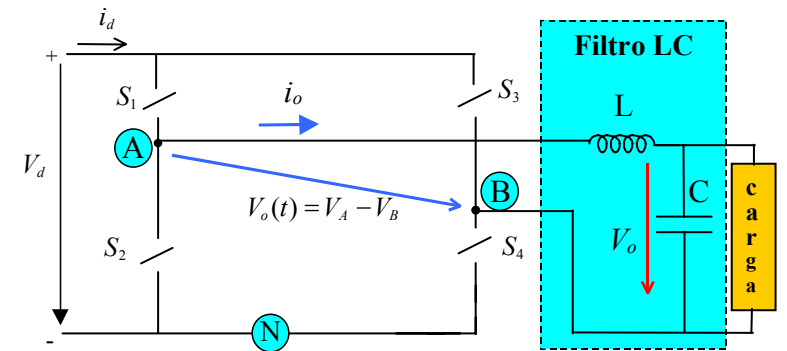
$$\frac{V_{control} + \bar{V}_{tri}}{2 \bar{V}_{tri}} = \frac{t_{on}}{T_S} = D \Rightarrow$$

$$V_{control} = \bar{V}_{tri} (2D - 1)$$

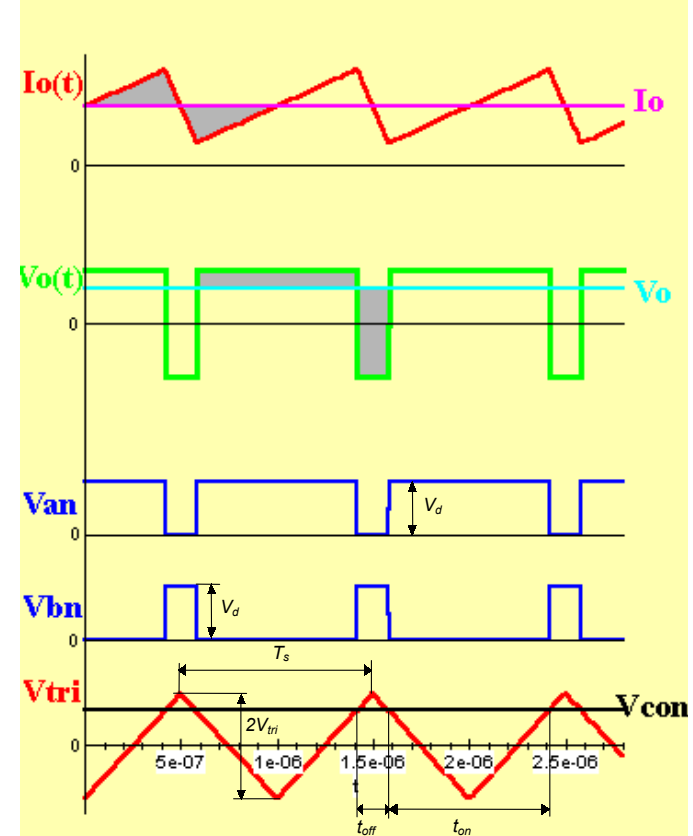
$$V_o = \frac{1}{T_S} [V_d \cdot t_{on} - V_d (T_S - t_{on})]$$

$$V_o = \left(\frac{V_d}{\bar{V}_{tri}} \right) \cdot V_{control} = k \cdot V_{control}$$

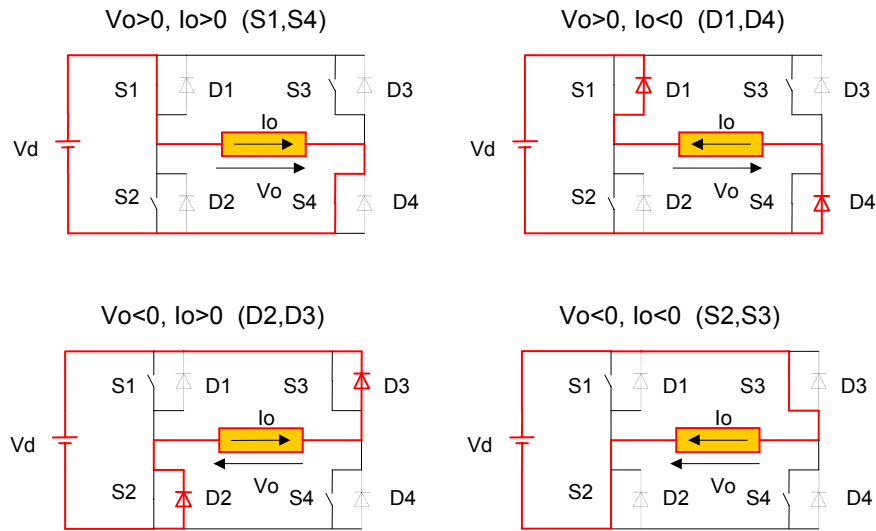
CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



Convertidor Puente alimentando una carga de continua con filtro LC

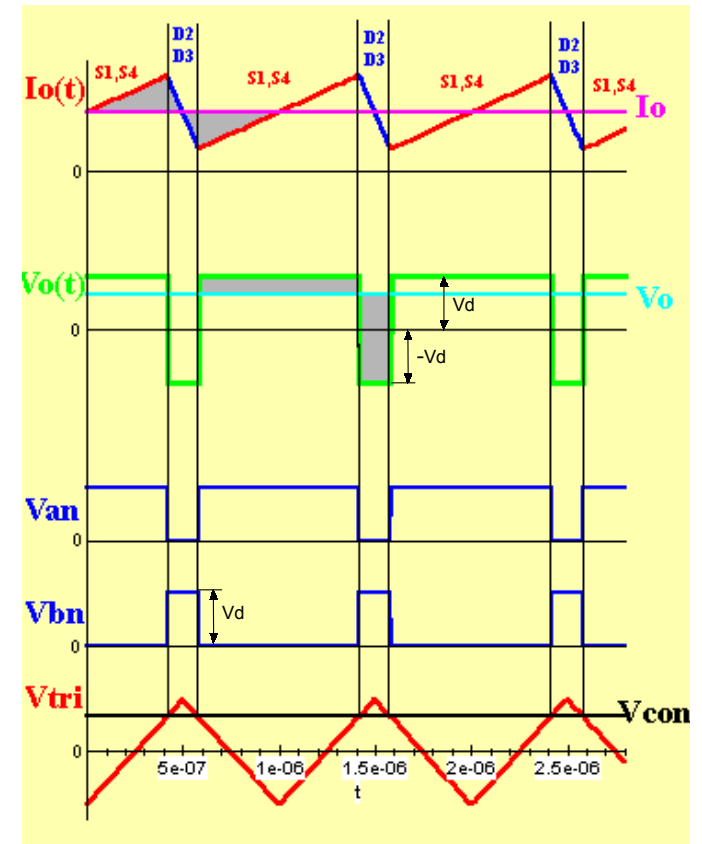


CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



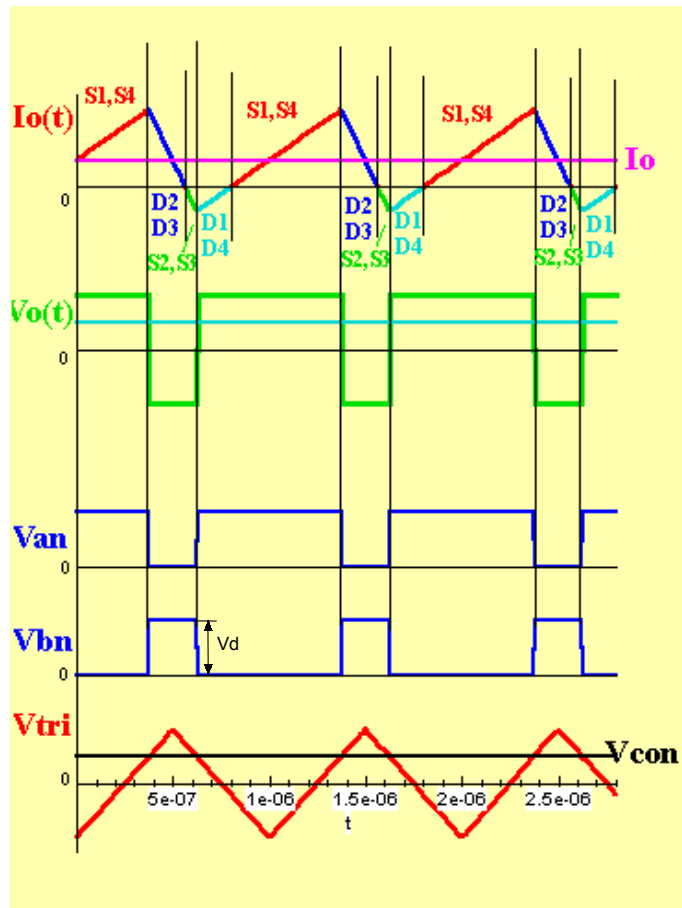
Convertidor Puente: Circulación de la corriente por los dispositivos con control bipolar

CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



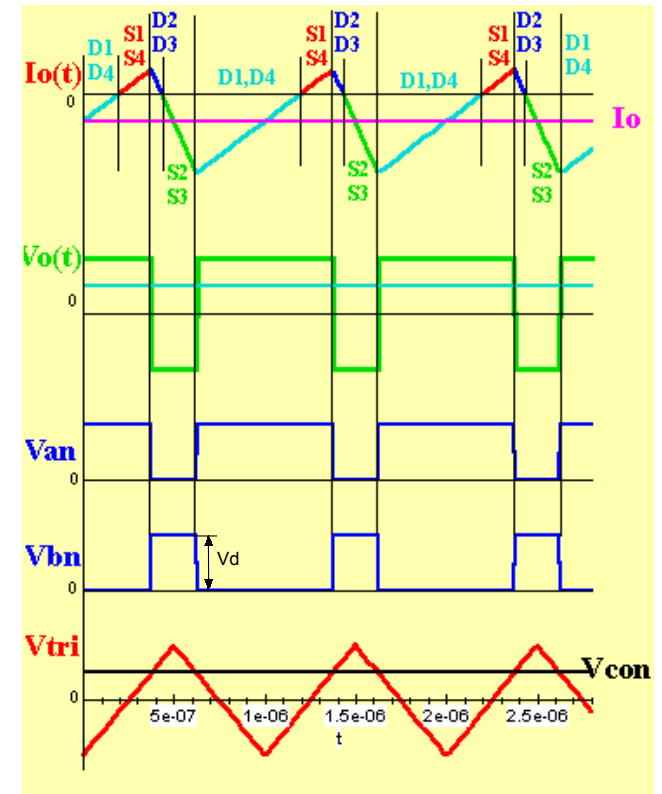
Dispositivos conduciendo: I_o siempre positiva

CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



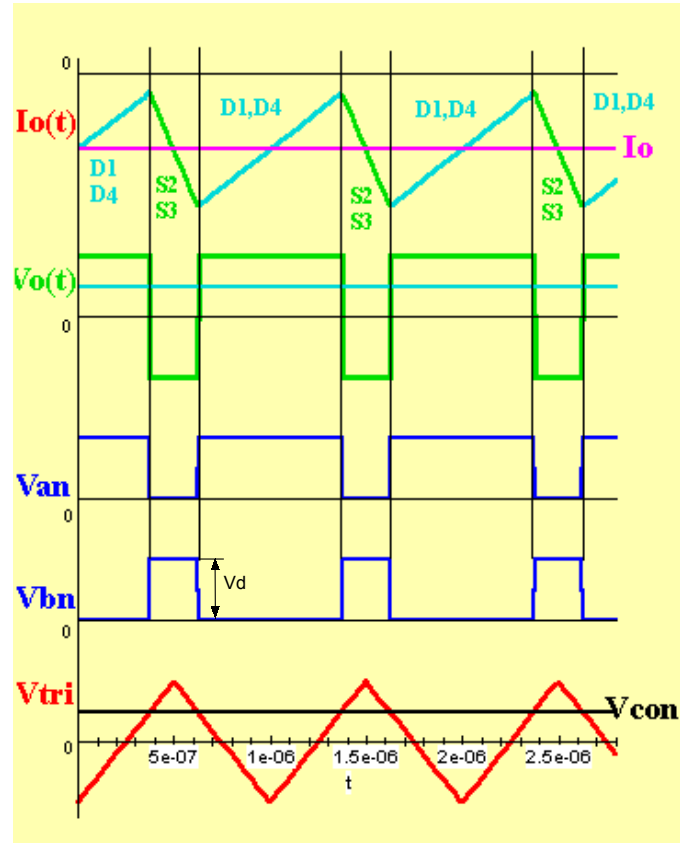
Dispositivos conduciendo: I_o media positiva,
pero $I_o(t)$ cambia de signo

CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



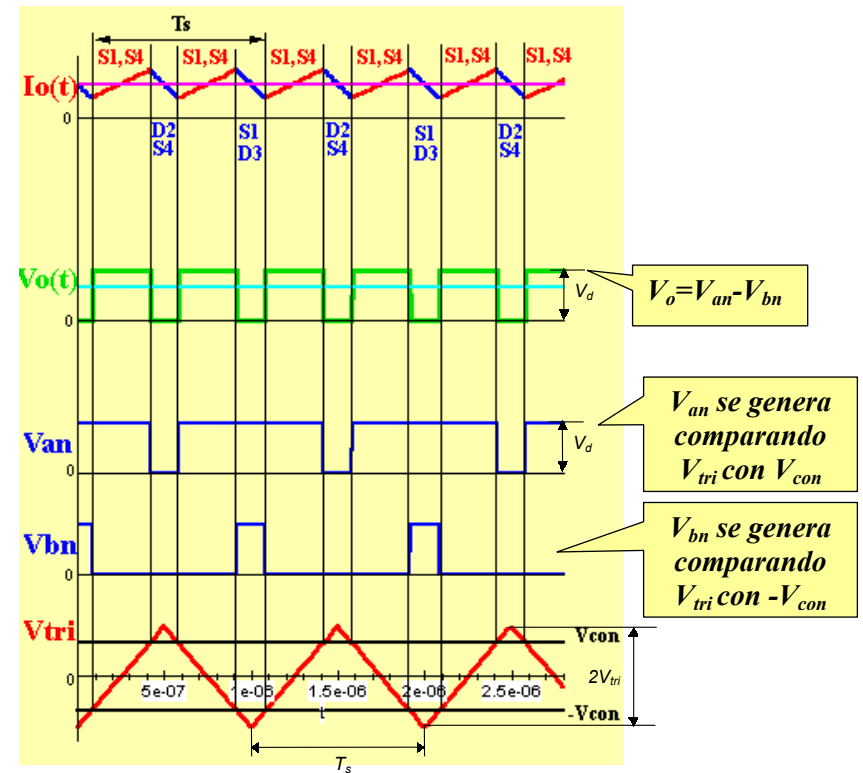
Dispositivos conduciendo: I_o media negativa,
pero $I_o(t)$ cambia de signo

CONVERTIDOR PUENTE. Control Bipolar



Dispositivos conduciendo: I_o siempre negativa

CONVERTIDOR PUENTE. Control Unipolar



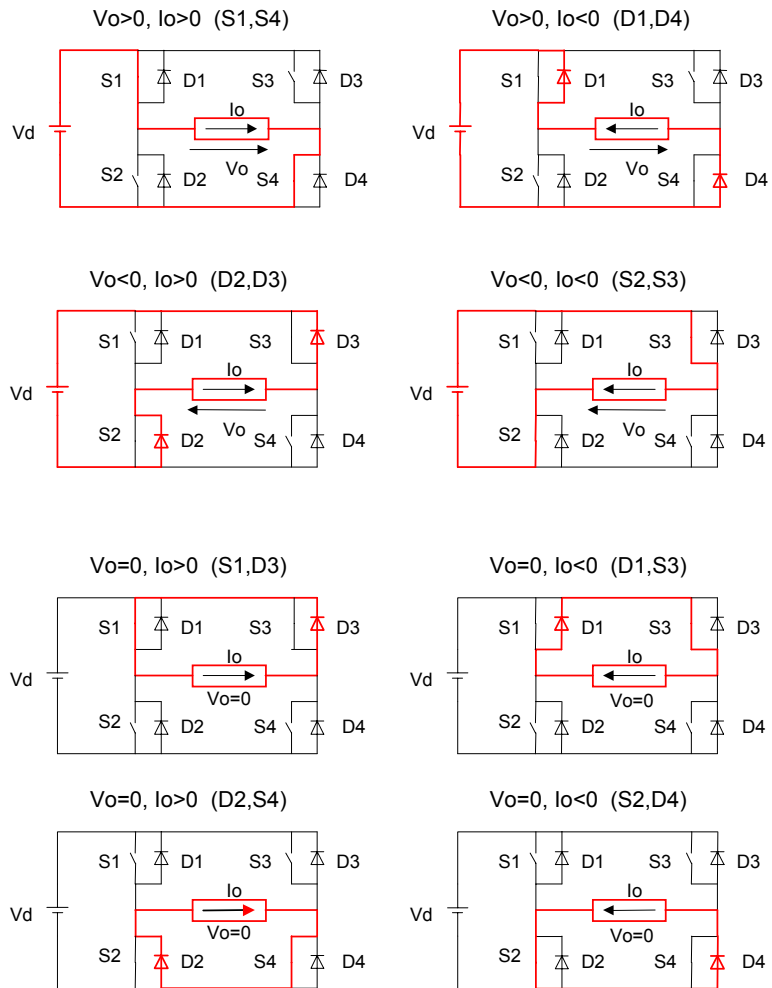
Convertidor Puente: Control Unipolar

$$\left. \begin{aligned}
 D_A &= \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{V_{cont} + \hat{V}_{tri}}{2 \hat{V}_{tri}} \\
 D_B &= \frac{t'_{on}}{T_S} = \frac{\hat{V}_{tri} - V_{cont}}{2 \hat{V}_{tri}} \\
 V_o &= V_d \cdot D_A - V_d \cdot D_B = \\
 V_o &= V_d (D_A - D_B)
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow D_A - D_B = \frac{V_{cont} + \hat{V}_{tri} - \hat{V}_{tri} + V_{cont}}{2 \hat{V}_{tri}} = \frac{V_{cont}}{\hat{V}_{tri}}$$

$$\Rightarrow V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} \cdot V_{cont} = k \cdot V_{cont}$$

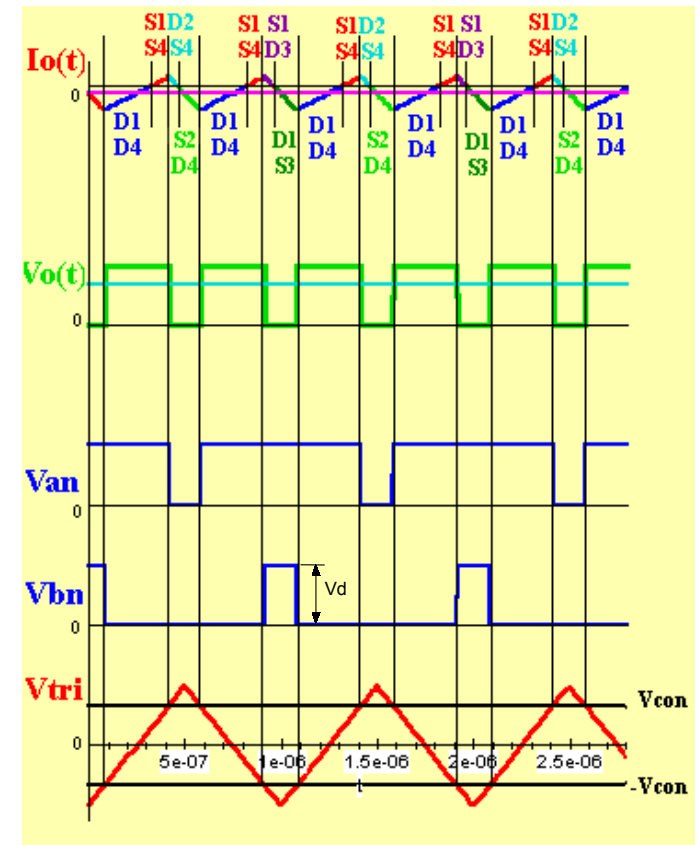
La tensión de salida es igual que en el control Bipolar, pero la frecuencia del rizado en la tensión de salida es doble \Rightarrow Componentes del filtro más baratos.

CONVERTIDOR PUENTE. Control Unipolar



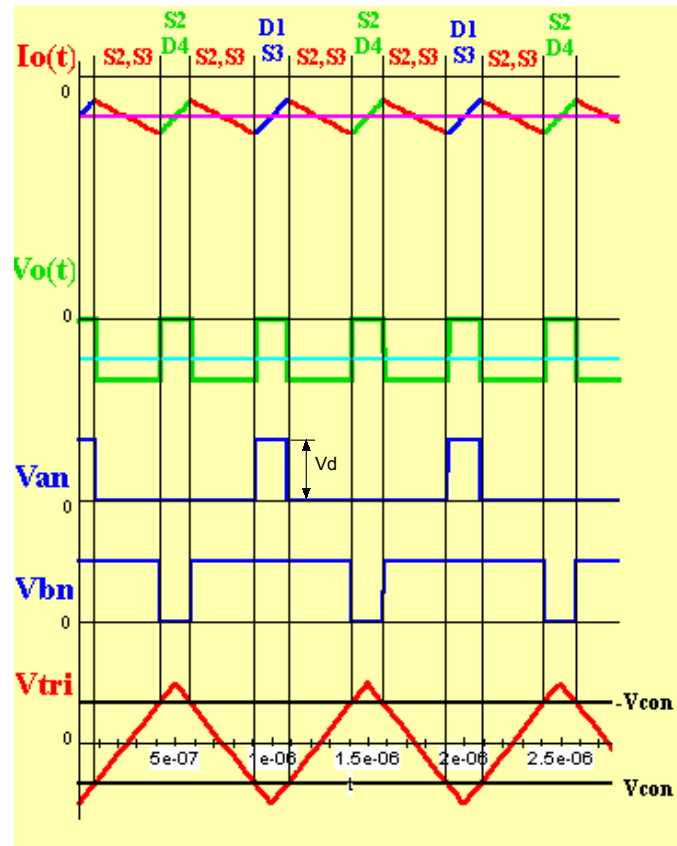
Convertidor Puente: Circulación de la corriente por los dispositivos con control unipolar

CONVERTIDOR PUENTE. Control Unipolar



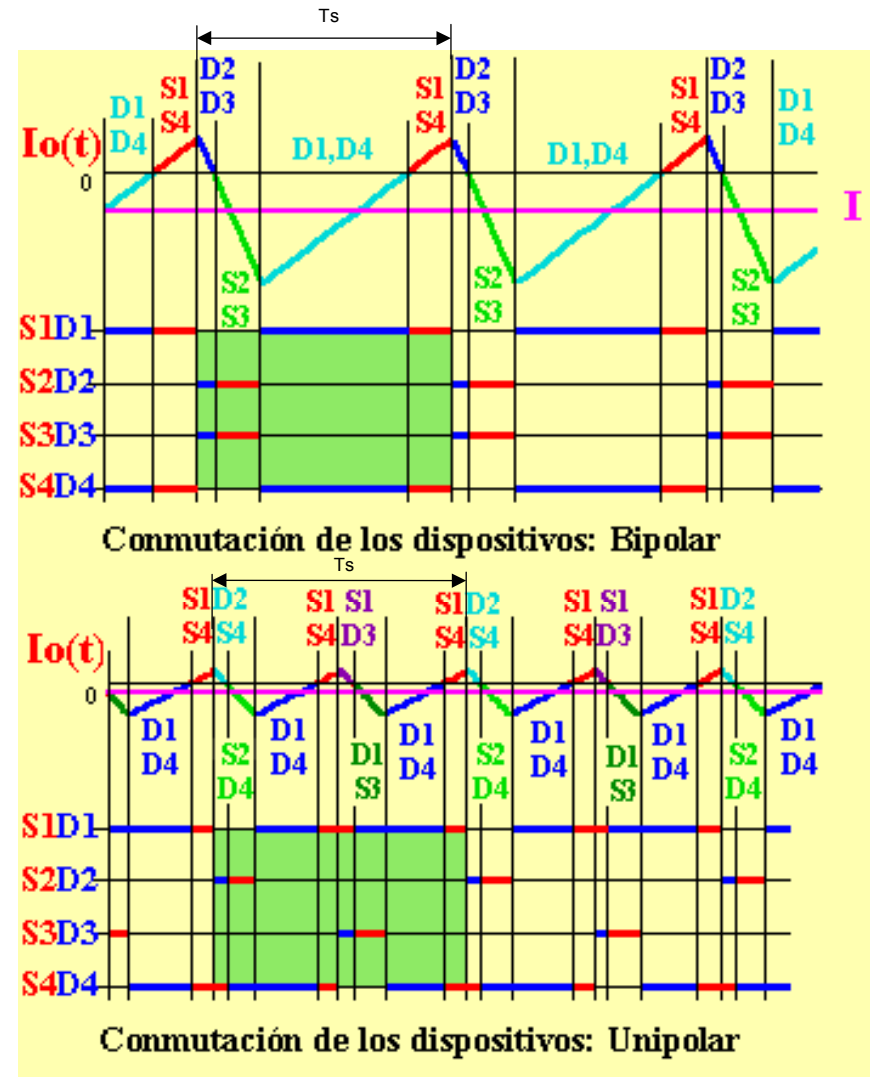
Convertidor Puente: Circulación de la corriente por los dispositivos con control unipolar. Corriente media negativa pero con valores positivos y negativos. Tensión de salida positiva

CONVERTIDOR PUENTE. Control Unipolar

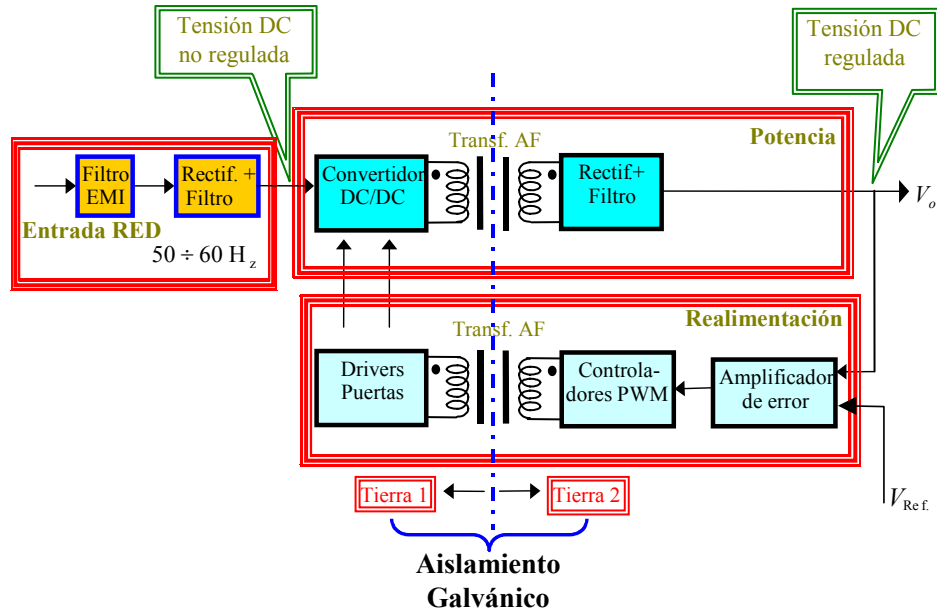


Convertidor Puente: Circulación de la corriente por los dispositivos con control unipolar. Corriente siempre negativa. Tensión de salida negativa.

CONVERTIDOR PUENTE. Control Unipolar



CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO

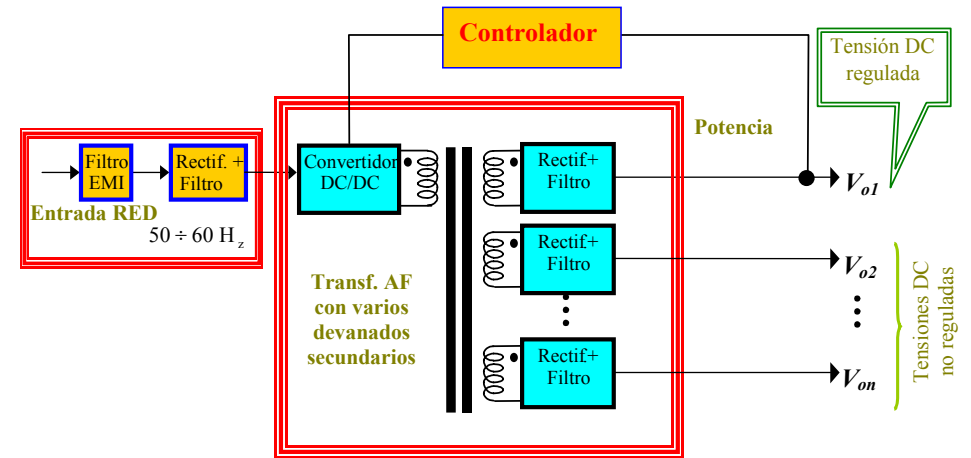


Esquema General de una Fuente de Alimentación

Objetivos:

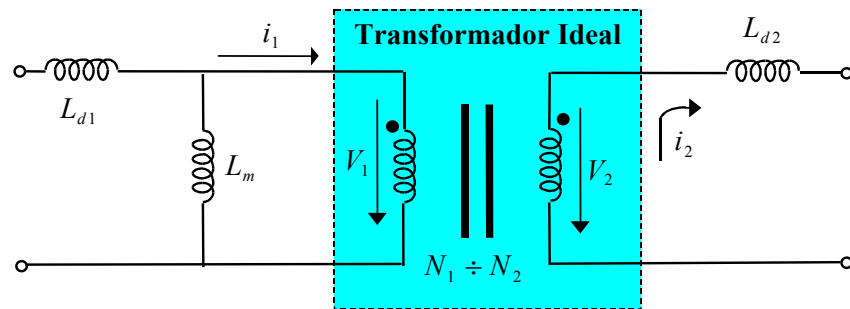
- **Aislamiento galvánico** entre Red y V_o .
- **Evitar la transformación de 50/60 Hz** por ser muy pesado y costoso el transformador.
- Tener una **mayor relación de transformación** $\frac{V_o}{V_i}$ que la que permite D , al multiplicar por $\frac{N_2}{N_1}$.

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO



Esquema General de una Fuente de Alimentación multisalida

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO



Circuito Equivalente de un Transformador

- Se **desprecian las pérdidas** debidas a las resistencias de los devanados y núcleos

➤ Relación de transformación: $\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$

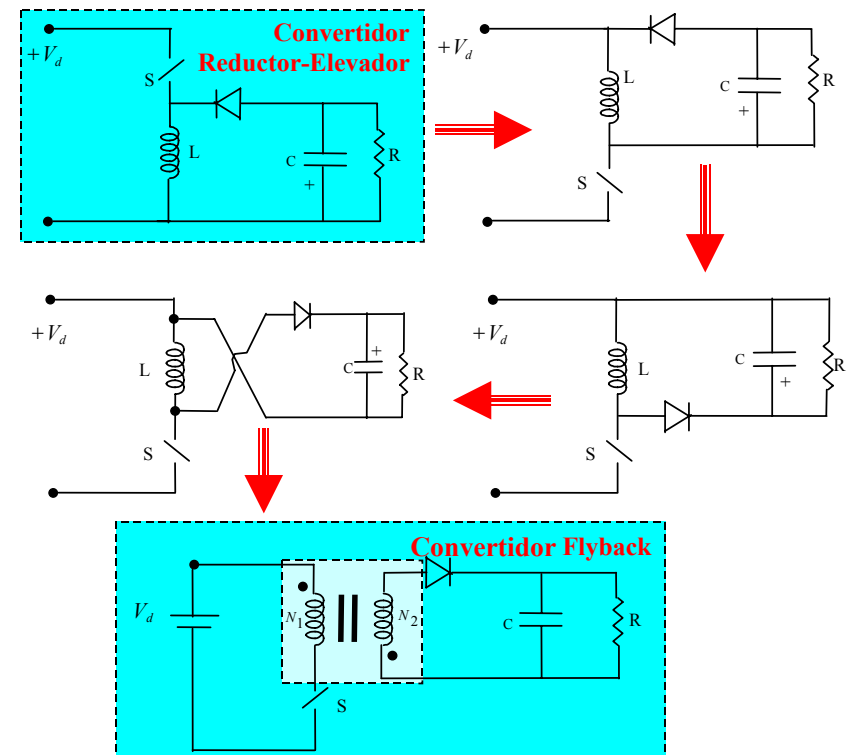
➤ Igualdad de potencias: $P = V_1 \cdot i_1 = V_2 \cdot i_2 \Rightarrow$

➤ Relación de corrientes: $\frac{i_1}{N_2} = \frac{i_2}{N_1}$

- Inductancias de dispersión: L_{d1}, L_{d2} : **Tan pequeñas como sea posible** (fuerte acoplamiento magnético entre primario y secundario). Ya que la energía que almacenan la deben **absorber los interruptores**.

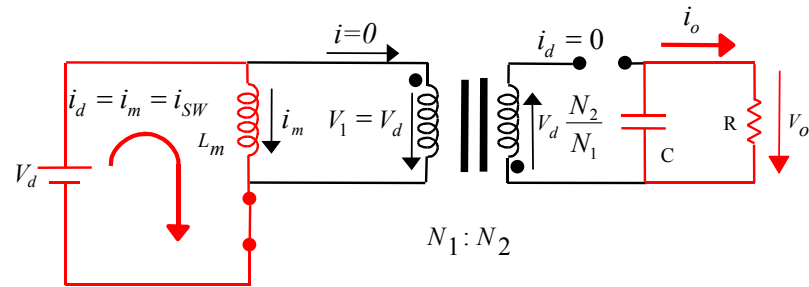
- Inductancia de magnetización: L_m : **Tan grande como sea posible** (excepto en el convertidor Flyback), ya que las corrientes de magnetización **se suman** a las de los devanados para formar las corrientes por los interruptores y **aumentan las pérdidas**.

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Flyback

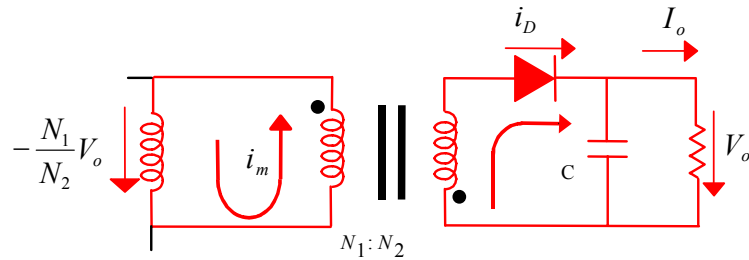


Origen del Convertidor Flyback desde el Convertidor Reductor-Elevador

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Flyback



Circuito Equivalente del Convertidor Flyback con el Interruptor Cerrado



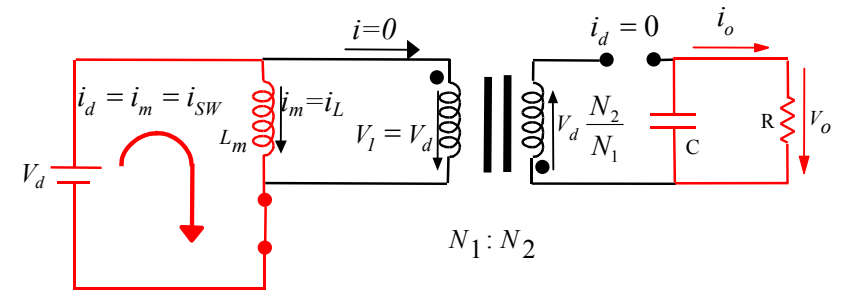
Circuito Equivalente del Convertidor Flyback con el Interruptor Abierto

Integrando en un ciclo la tensión aplicada a la inductancia de magnetización:

$$V_d DT_s - \frac{N_1}{N_2} V_o (1-D) T_s = 0 \Rightarrow$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D}}$$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Flyback

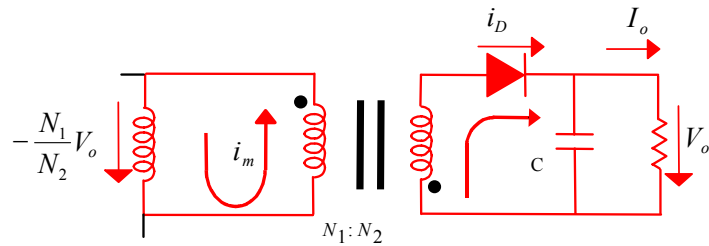


Circuito Equivalente del Convertidor Flyback con el Interruptor Cerrado

$$i_L(t) = i_{SW}(t) = I_{Lmin} + \frac{V_d}{L_m} \cdot t \quad (0 < t < t_{on} = DT_s)$$

$$I_{Lmax} = I_{Lmin} + \frac{V_d \cdot DT_s}{L_m}$$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Flyback



Circuito equivalente del convertidor Flyback con el interruptor abierto

$$i_L(t) = I_{Lmax} - \frac{V_d D}{1-D} \frac{(t - DT_S)}{L_m} \Rightarrow I_{Lmin} = I_{Lmax} - \frac{V_d D T_S}{L_m}$$

$$I_{Dmax} = I_{Lmax} \frac{N_1}{N_2}; \quad I_{Dmin} = I_{Lmin} \frac{N_1}{N_2}$$

$$i_D(t) = i_L(t) \frac{N_1}{N_2} = I_{Dmax} - \frac{V_d D}{(1-D)L_m} \frac{N_1}{N_2} t = I_{Dmax} - \frac{V_o}{L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 t$$

$$I_{Dmin} = I_{Dmax} - \frac{V_o}{L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 (1-D)T_S$$

Como el valor medio de i_D es I_o , se puede calcular I_{Dmax}

$$I_o = \frac{1}{T_S} \left(I_{Dmax} (1-D)T_S - \frac{V_o T_S (1-D)^2}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \right) =$$

$$I_o = (1-D) \left(I_{Dmax} - \frac{V_o (1-D)T_S}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \right) \Rightarrow$$

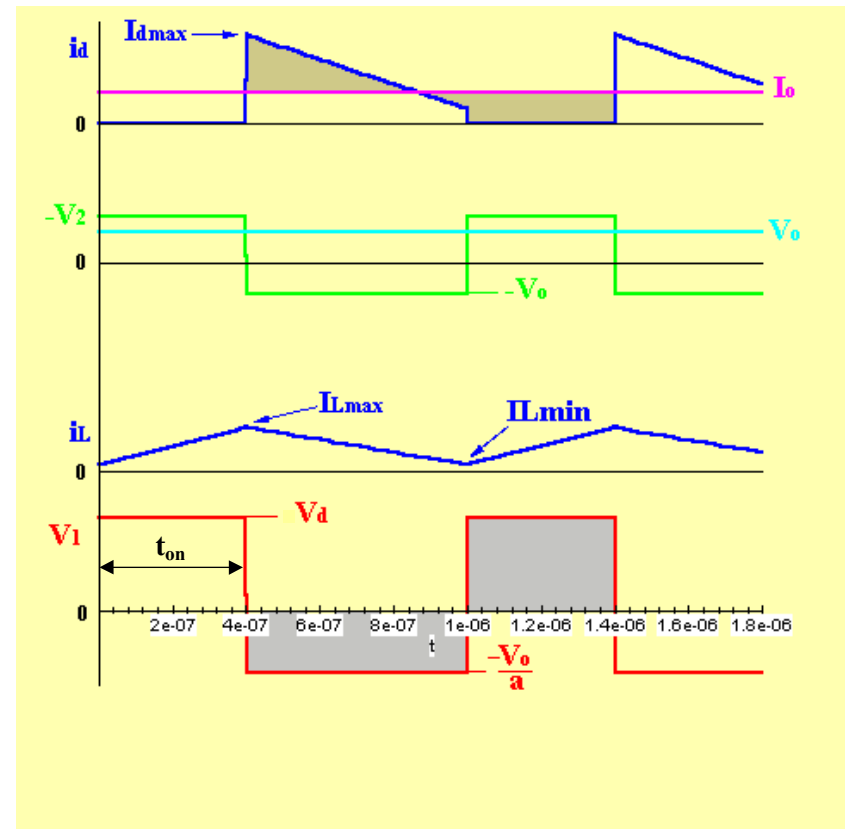
$$I_{Dmax} = \frac{I_o}{1-D} + \frac{V_o (1-D)T_S}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$I_{Dmin} = \frac{I_o}{1-D} - \frac{V_o (1-D)T_S}{2L_m} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

El voltaje aplicado al interruptor cuando está abierto:

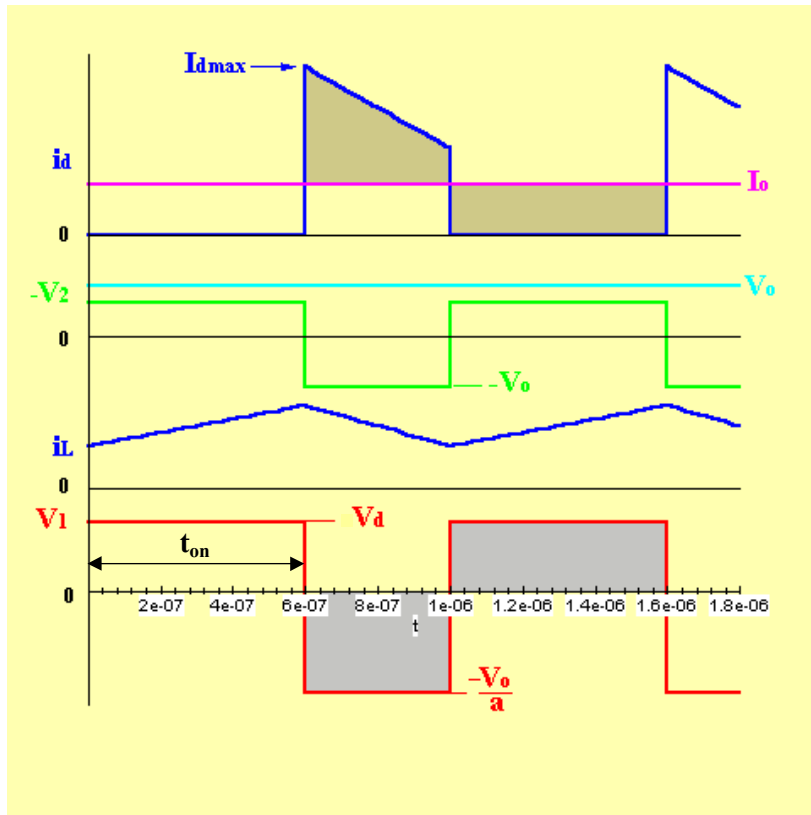
$$V_{SW} = V_d + \frac{N_1}{N_2} \cdot V_o = \frac{V_d}{1-D}$$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Flyback



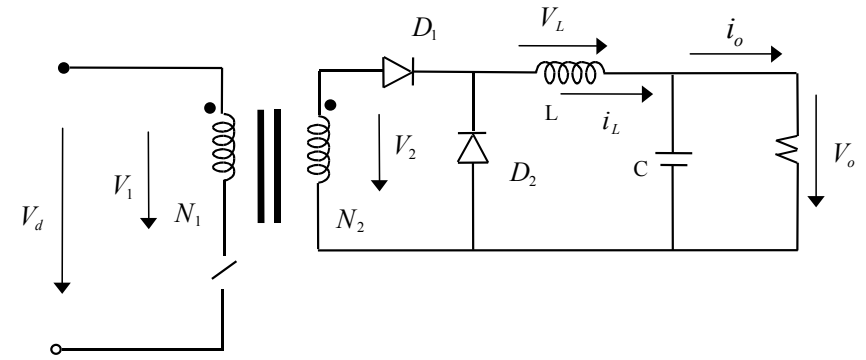
Convertidor Flyback: Funcionamiento para $D=0.4$ y $a=0.5$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Flyback



Convertidor Flyback: Funcionamiento para $D=0.6$ y $a=0.5$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Forward



Convertidor Forward Ideal

Si el transformador ideal, cuando el interruptor está cerrado:

$$V_1 = V_d; \quad V_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_d$$

$$V_L = V_d \cdot \frac{N_2}{N_1} - V_o \quad (0 < t < t_{on})$$

Esta tensión debe ser positiva (es un reductor visto desde V_2) luego en este intervalo i_L aumenta.

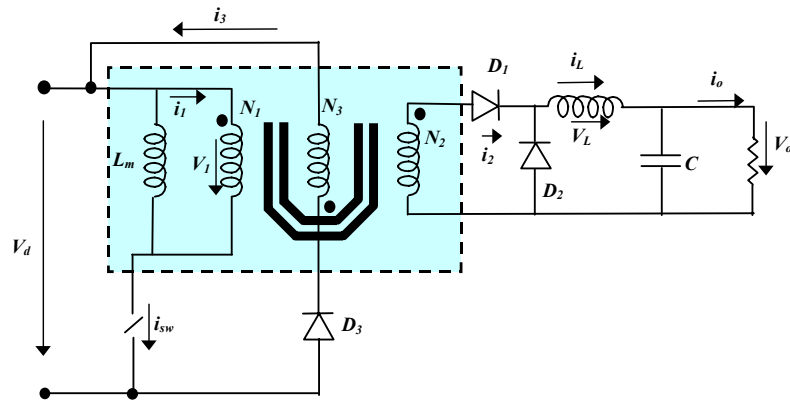
Cuando el interruptor se abre, i_L circula por D_2 y
 $V_L = -V_o \quad (t_{on} < t < T_S) \Rightarrow i_L$ disminuye.

Igualando la integral de $V_L dt$ en los dos períodos queda:

$$\left(V_d \cdot \frac{N_2}{N_1} - V_o \right) \cdot t_{on} = V_o \cdot (T_S - t_{on})$$

$$\left(V_d \cdot \frac{N_2}{N_1} - V_o \right) \cdot D = V_o \cdot (1 - D) \Rightarrow \boxed{\frac{V_o}{V_d} = \frac{N_2}{N_1} \cdot D}$$

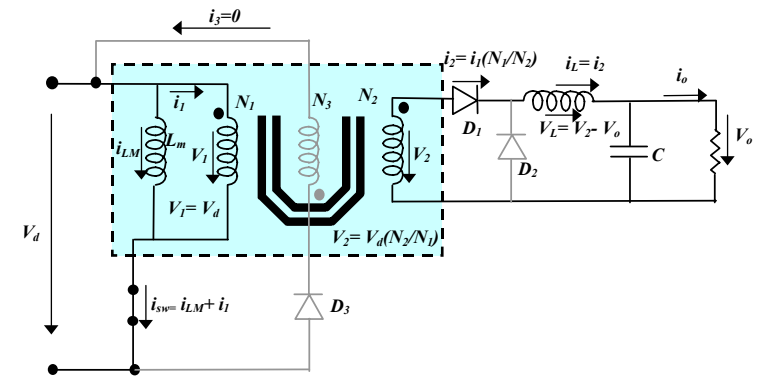
CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Forward



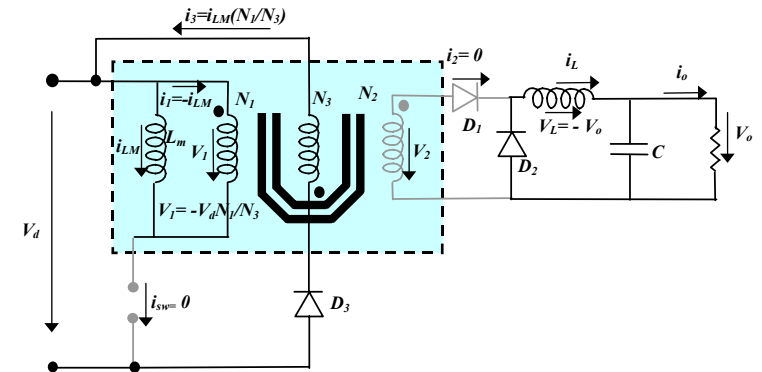
Convertidor Forward Real:

Se añade un tercer devanado que permite que la energía almacenada en L_m cuando el interruptor está cerrado, se devuelva a la batería al abrirlo.

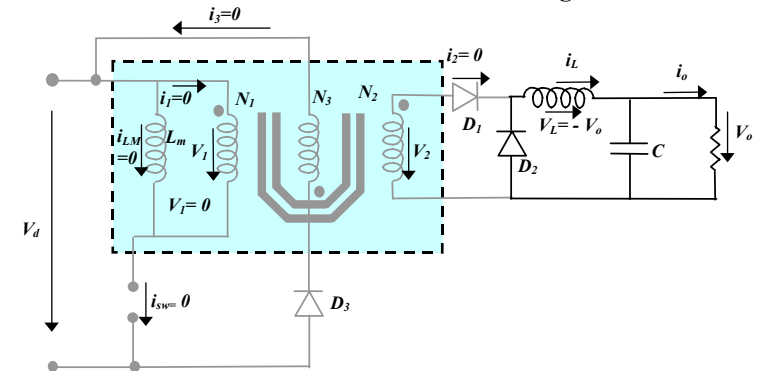
CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Forward



Convertidor Forward: Intervalo de conducción



Convertidor Forward: Intervalo de desmagnetización



Convertidor Forward: Intervalo de no conducción

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Forward

Funcionamiento del convertidor Forward

Con el **interruptor cerrado**: $V_1 = V_d$ ($0 < t < t_{on}$),
 i_m sube linealmente desde cero a $I_{L_{max}}$.

Cuando se **abre el interruptor** $i_1 = -i_m$

$N_1 \cdot i_1 + N_3 \cdot i_3 = N_2 \cdot i_2$, como hay un diodo D_1 , $i_2 = 0 \Rightarrow$ la corriente $i_3 = \frac{N_1}{N_3} \cdot i_m$ fluirá a través del devanado auxiliar, devolviendo energía a la batería.

Durante t_m , la tensión aplicada al primario y a L_m es:

$$V_1 = -\frac{N_1}{N_3} \cdot V_d \quad (t_{on} < t < t_{on} + t_m)$$

t_m se puede calcular de: $V_d \cdot t_{on} = \frac{N_1}{N_3} \cdot V_d \cdot (t_m)$

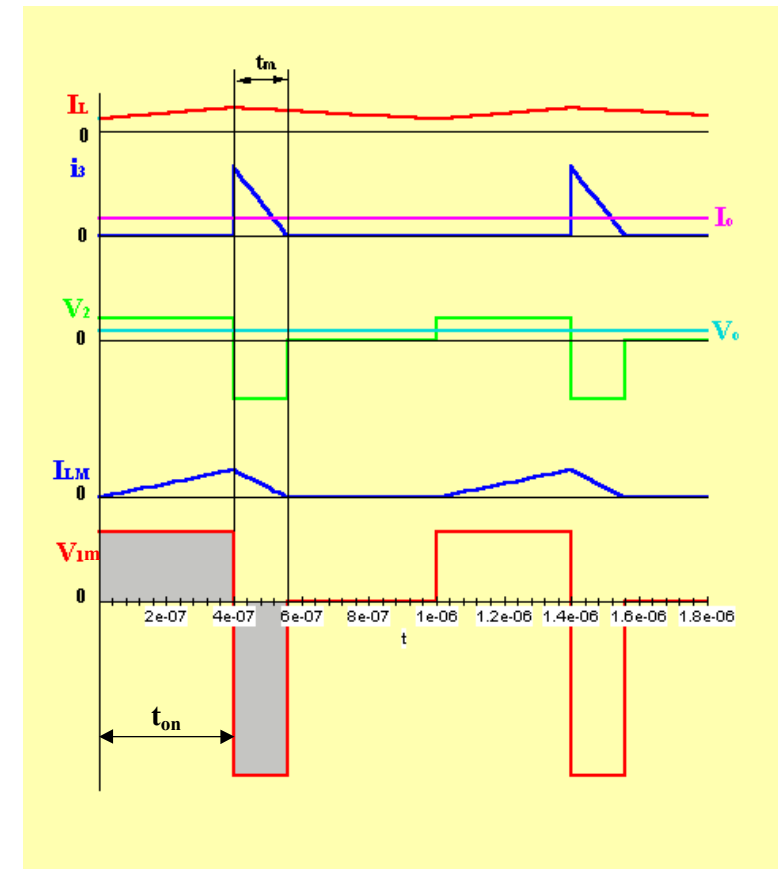
$$\frac{t_m}{T_s} = \frac{N_3}{N_1} \cdot D$$

Se tiene que cumplir que:

$$t_m < t_{off} \Rightarrow \frac{t_m}{T_s} < 1 - D \text{ luego: } (1 - D_{max}) = \frac{N_3}{N_1} \cdot D_{max}$$

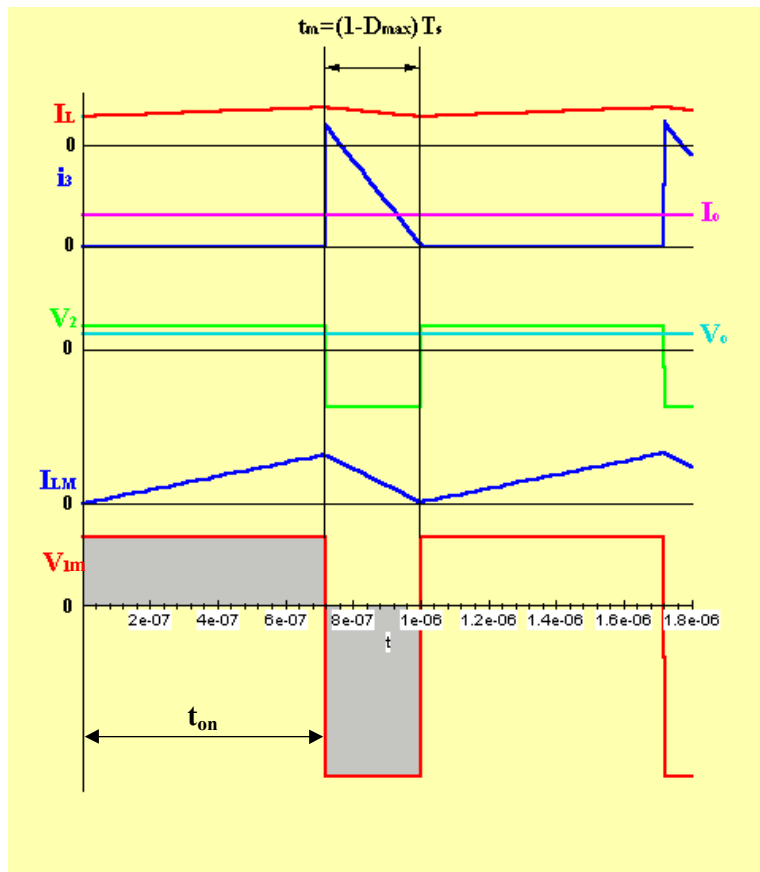
$$D_{max} = \frac{1}{1 + \frac{N_3}{N_1}}$$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Forward



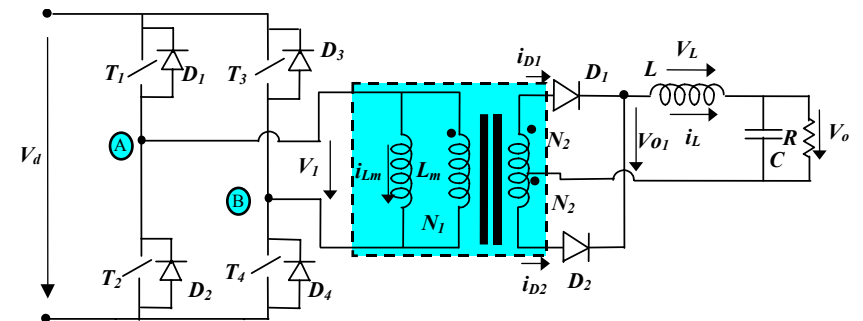
Convertidor Forward: Funcionamiento para $D=0.4$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Forward



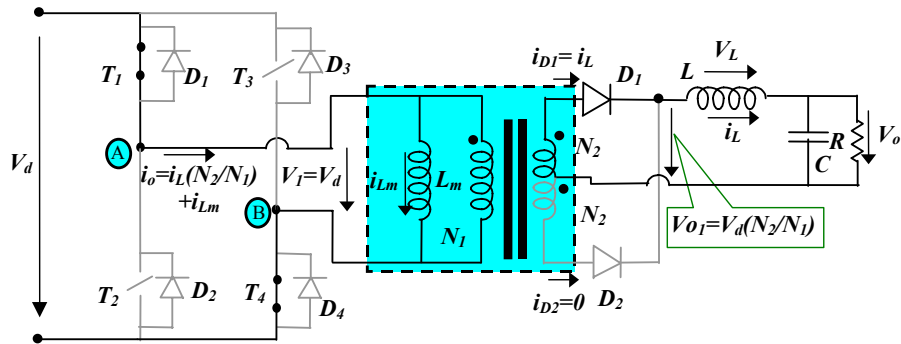
Convertidor Forward: Funcionamiento para $D = D_{max}$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Punte

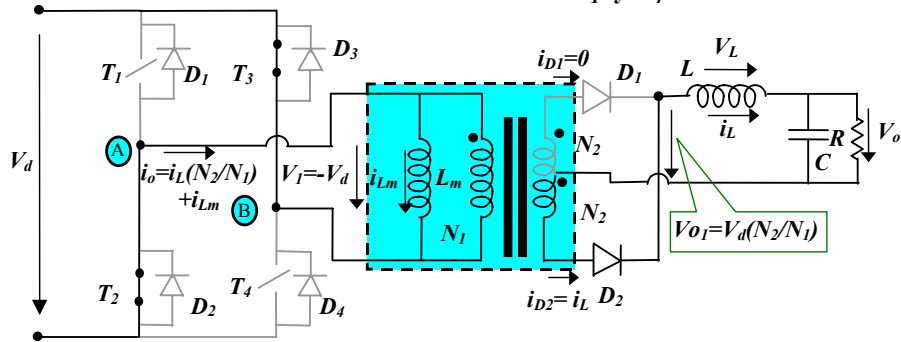


Convertidor Punte con transformador

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Puente



Funcionamiento del Convertidor Puente: T_1 y T_4 conduciendo

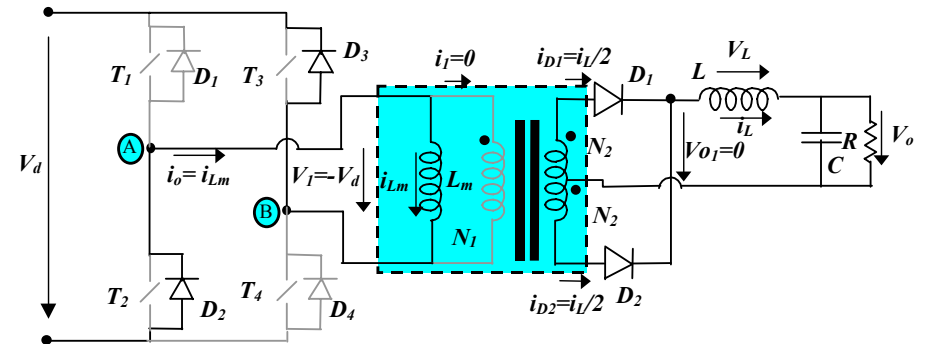


Funcionamiento del Convertidor Puente: T_2 y T_3 conduciendo

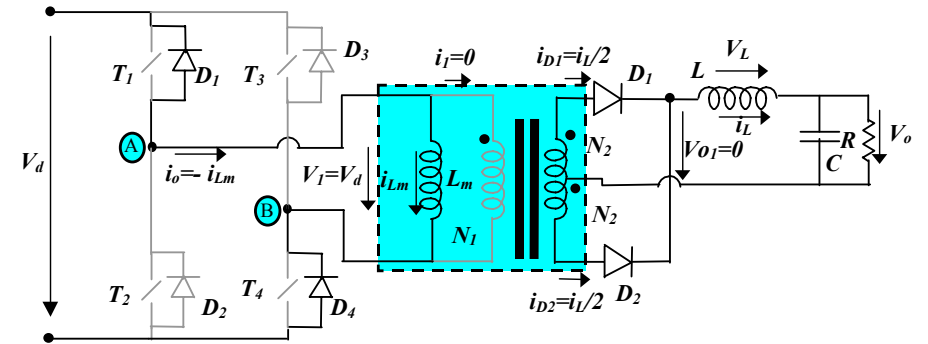
$$\left. \begin{array}{l} T_1 - T_4 \Rightarrow V_1 = +V_d \\ T_2 - T_3 \Rightarrow V_1 = -V_d \end{array} \right\} \Rightarrow V_{o1} = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_d$$

La tensión en la bobina es: $V_L = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_d - V_o$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO.
Convertidor Puente



Funcionamiento del Convertidor Puente: D_2 y D_3 conduciendo

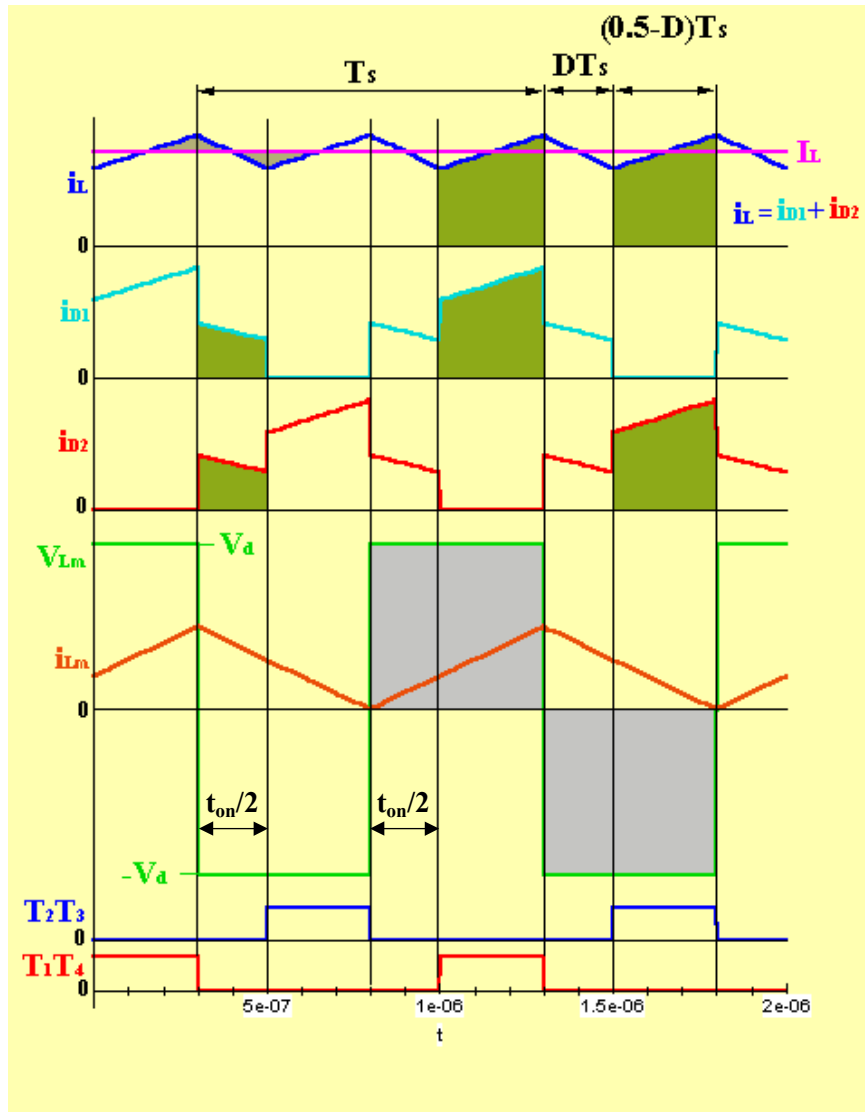


Funcionamiento del Convertidor Puente: D_1 y D_4 conduciendo

La relación de transformación se obtiene de integrar la tensión en la bobina en medio ciclo (ya que el otro medio es idéntico):

$$\left(\frac{N_2}{N_1} \cdot V_d - V_o \right) \cdot D \cdot T_S = V_o \cdot T_S \cdot (0.5 - D) \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = 2 \frac{N_2}{N_1} \cdot D$$

CONVERTIDORES CON AISLAMIENTO GALVÁNICO. Convertidor Punte



Funcionamiento del convertidor Punte para $D=0.3$

CIRCUITOS DE CONTROL DE CONVERTIDORES

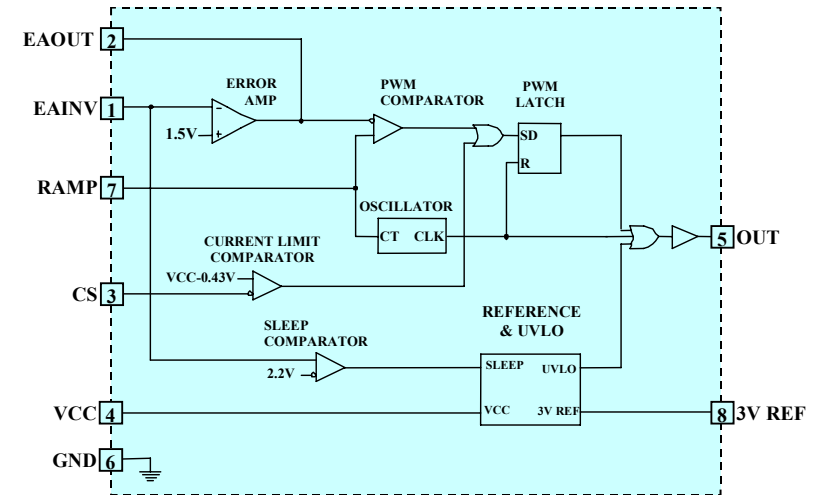
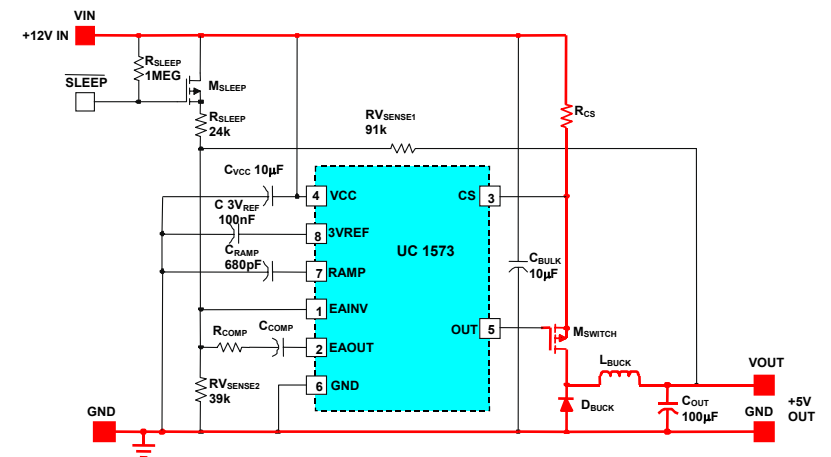


Diagrama de bloques del controlador UC1573



Realización de un Convertidor Reductor con el controlador UC1573

CIRCUITOS DE CONTROL DE CONVERTIDORES

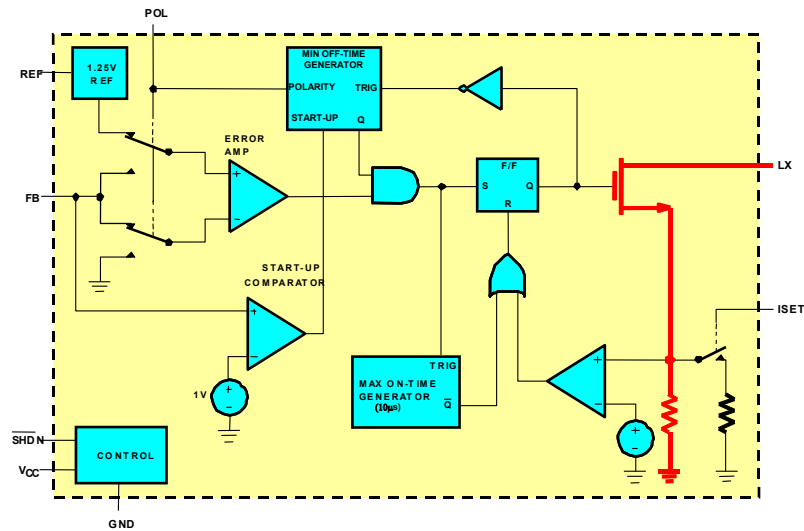
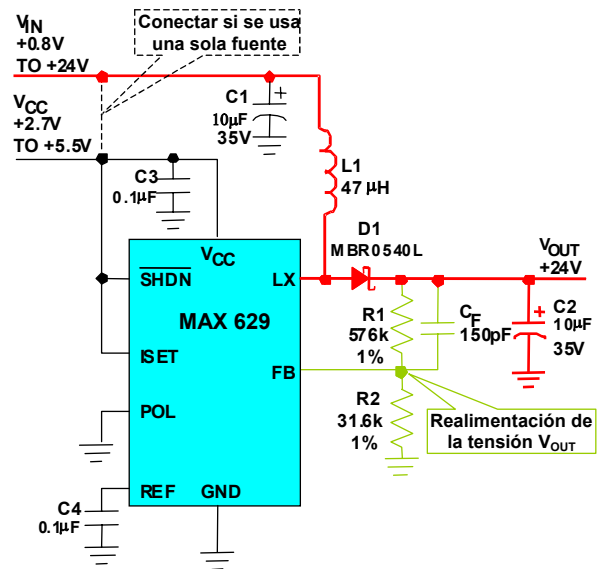


Diagrama de bloques del controlador MAX629



Convertidor Elevador realizado con el controlador MAX629