

TEMA 14. CONVERTIDORES CONMUTADOS CC-CC. TOPOLOGÍAS BÁSICAS CON UN SOLO INTERRUPTOR SIN AISLAMIENTO GALVÁNICO

14.1 INTRODUCCIÓN

14.2 CONTROL DE LOS CONVERTIDORES CC-CC

14.3 CONVERTIDOR REDUCTOR

14.3.1 Modo de Conducción Continua

14.3.2 Modo de Conducción Discontinua

14.3.2.1 Modo de Conducción Discontinua con V_d Constante

14.3.2.2 Modo de Conducción Discontinua con V_o Constante

14.3.3 Rizado de la tensión de salida

14.3.4 Pérdidas en el Condensador

14.4 CONVERTIDOR ELEVADOR

14.4.1 Modo de Conducción Continua

14.4.2 Modo de Conducción Discontinua

14.4.3 Rizado de la tensión de salida

14.4.4 Efecto de componentes no ideales

14.5 CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR

14.5.1 Modo de Conducción Continua

14.5.2 Modo de Conducción Discontinua

14.5.3 Rizado de la tensión de salida

14.5.4 Efecto de componentes no ideales

14.6 CONVERTIDOR DE CÚK

14.6.1 Modo de Conducción Continua

14.6.2 Límite entre Modos de Conducción

INTRODUCCIÓN

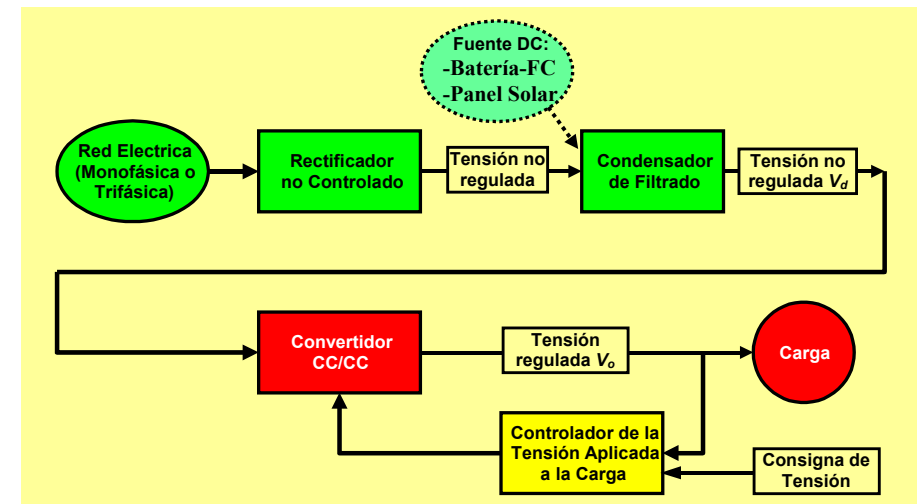


Diagrama de Bloques Típico de un Convertidor CA-CC

Uso en fuentes de alimentación reguladas, control de motores DC y fuentes de energía alternativas.

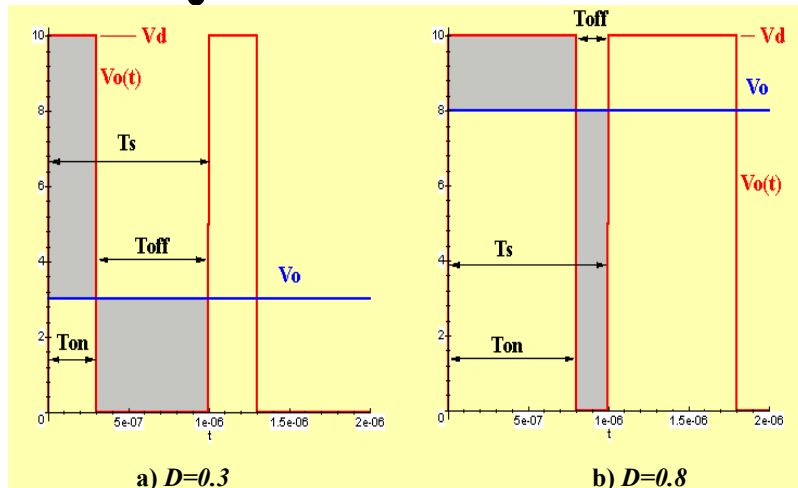
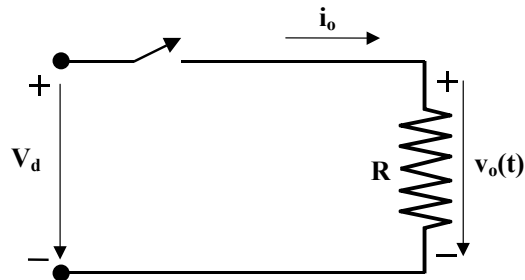
Topologías básicas con un solo interruptor de convertidores conmutados:
(Simples, en el próximo tema otras más complejas y con aislamiento galvánico)

- Convertidor **reductor** (Buck).
- Convertidor **elevador** (Boost).
- Convertidor **reductor-elevador** (Buck-Boost).
- Convertidor de **Cúk**.

Se supondrán las siguientes hipótesis:

- Funcionamiento en **régimen permanente**.
- Los dispositivos semiconductores serán considerados como **interruptores ideales**.
- Las **pérdidas** en los elementos inductivos y capacitivos serán **despreciadas**.
- La **alimentación continua** se supondrá constante en el tiempo.
- La etapa de salida del convertidor estará compuesta por **un filtro paso bajo y la carga (R)**. Cuando la carga es un **motor DC**, será necesario hacer otro tipo de modelado, (Tensión DC en serie con las L y R del devanado del motor).

CONTROL DE LOS CONVERTIDORES CC-CC



Para $T_S = t_{on} + t_{off}$, se define: $D = \frac{t_{on}}{T_S}$

El **valor medio** V_o aplicado a la carga R será:

$$V_o = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_o(t) dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{t_{on}} V_d dt + \frac{1}{T_S} \int_{t_{on}}^{T_S} 0 dt$$

$$V_o = \frac{1}{T_S} (V_d \cdot t_{on} + 0 \cdot t_{off})$$

$$V_o = V_d \cdot \frac{t_{on}}{T_S} = D \cdot V_d$$

CONTROL DE LOS CONVERTIDORES CC-CC

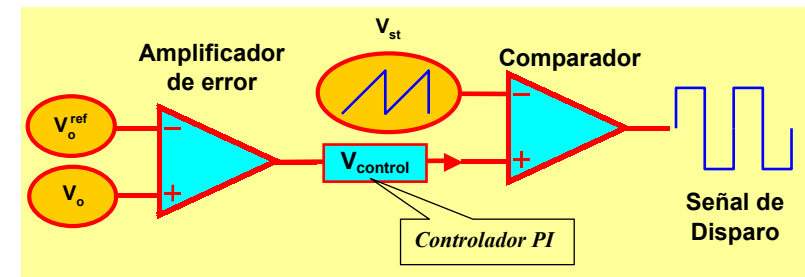
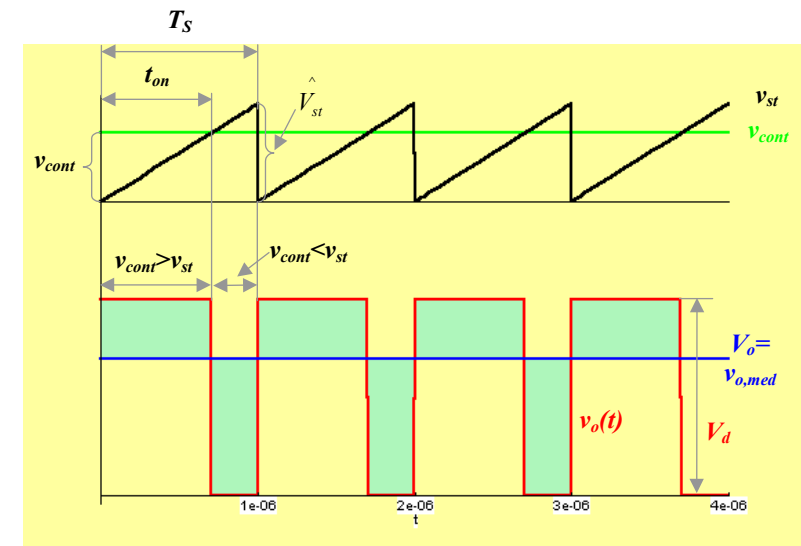


Diagrama de bloques de un controlador PWM

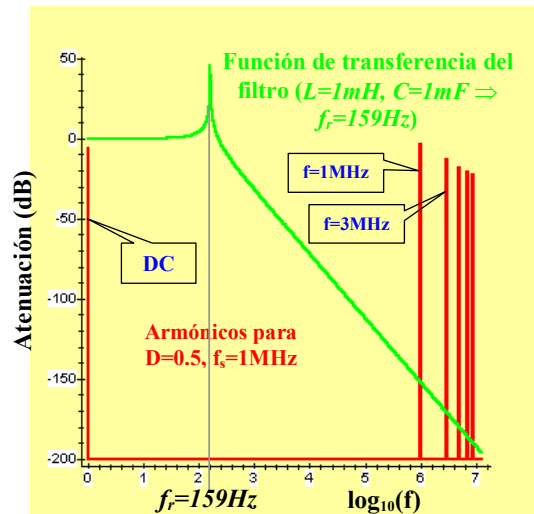
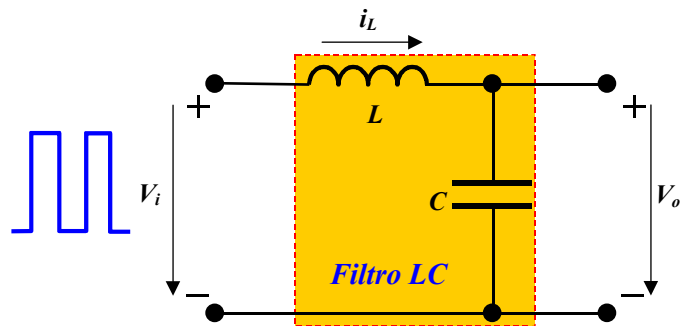


Generación de la Modulación por Anchura de Pulsos (PWM). Diagrama de Bloques y Estrategia de Comparación de Señales

Aplicando semejanza de triángulos: $D = \frac{t_{on}}{T_S} = \frac{v_{control}}{\hat{V}_{St}}$,

Luego: $V_o = D \cdot V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{St}} \cdot v_{control} = k \cdot v_{control}$

CONTROL DE LOS CONVERTIDORES CC-CC.
Filtrado de los armónicos de la tensión de salida



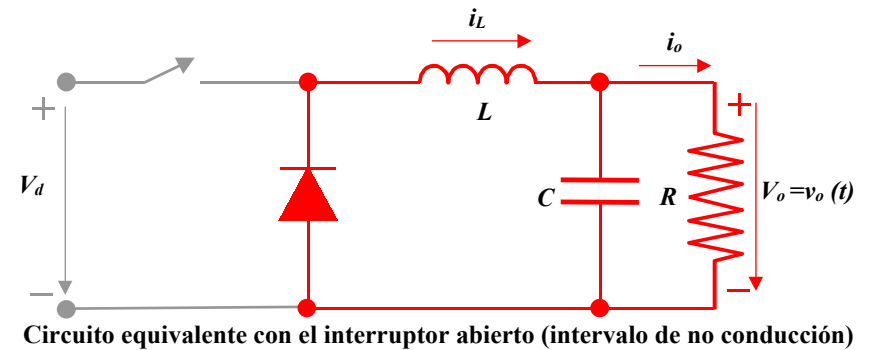
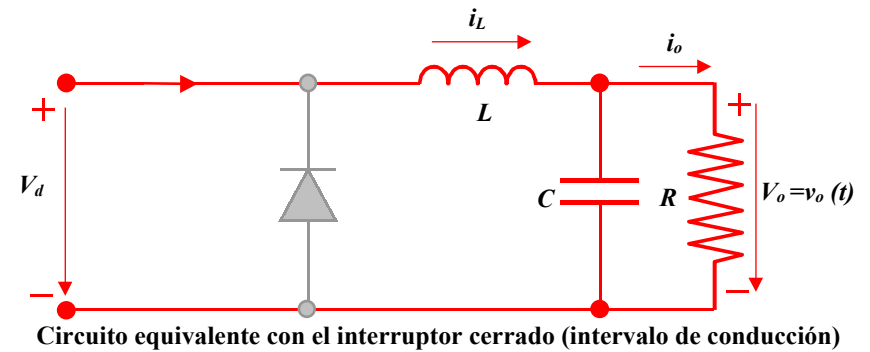
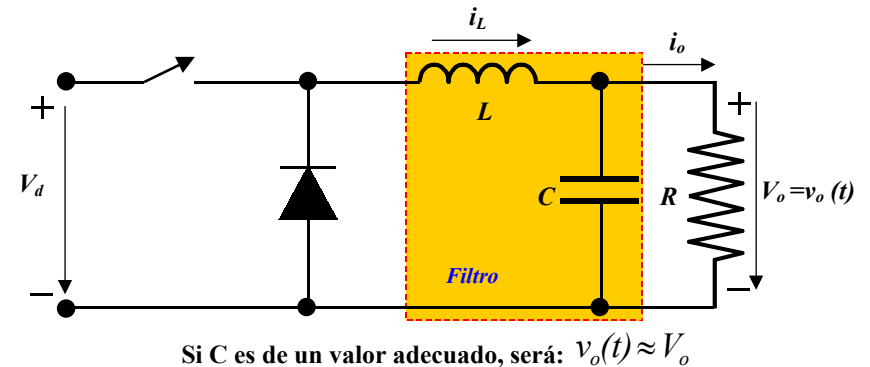
Empleo de un filtro LC para eliminar las frecuencias no deseadas en el convertidor.

La **frecuencia de resonancia del filtro LC** es:

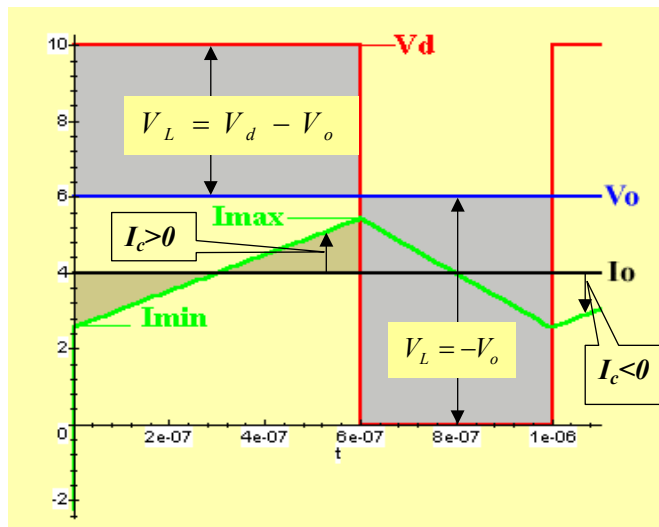
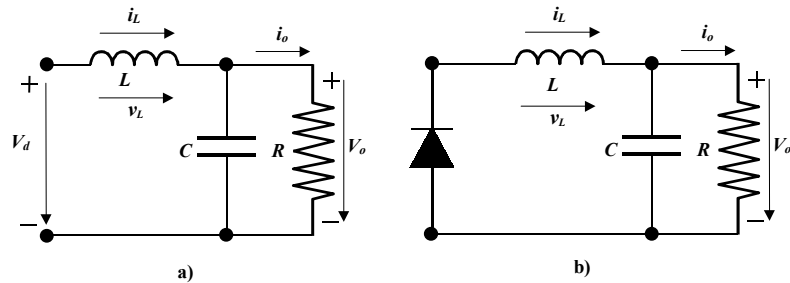
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f_r \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}},$$

para $L=1mH, C=1000\mu F$ resulta: $f_r=159Hz$

CONVERTIDOR REDUCTOR



CONVERTIDOR REDUCTOR. Modo de Conducción Continua



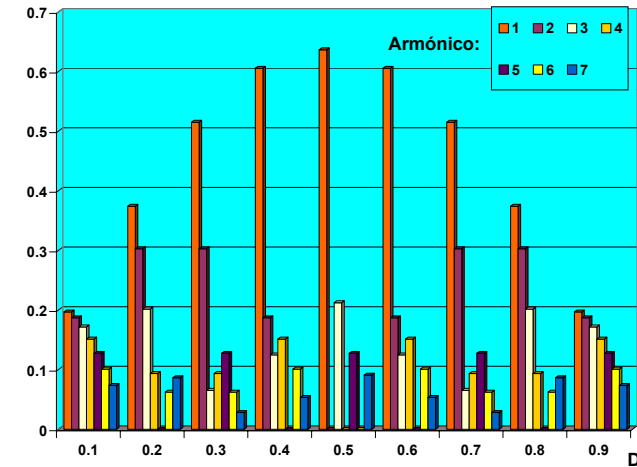
Análisis del Convertidor Reductor por Intervalos. (a) Intervalo de Conducción. (b) Intervalo de no Conducción

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = \int_0^{t_{on}} (V_d - V_o) dt + \int_{t_{on}}^{T_s} (-V_o) dt = 0$$

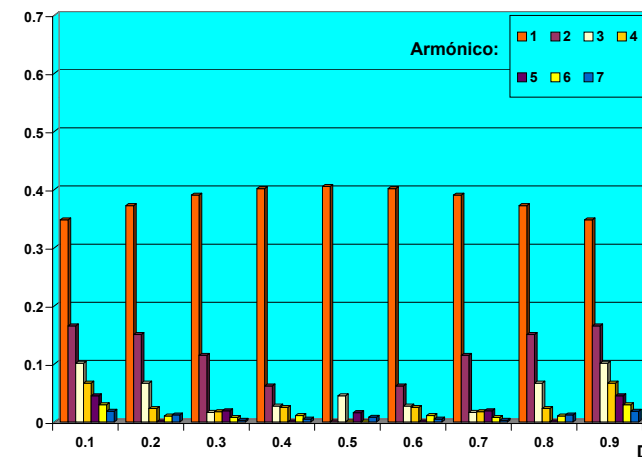
$$(V_d - V_o)t_{on} = V_o(T_s - t_{on}) \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D$$

Si se desprecian las pérdidas: $P_{ot} = V_o I_o = V_d I_d \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{1}{D}$

CONVERTIDOR REDUCTOR. Armónicos.



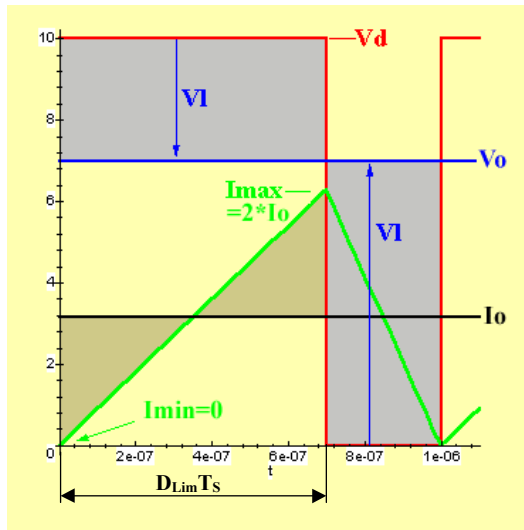
Armónicos de una onda cuadrada en función de D



Armónicos de una onda triangular en función de D

CONVERTIDOR REDUCTOR.

Modo de Conducción Discontinua con V_d Constante



Límite entre Modo de Conducción Continua y Discontinua:
(V_d constante y V_o regulable con D), $V_o = DV_d$

En el límite del modo continuo a discontinuo:

La corriente media por L ($I_{LB} = I_o$, ya que en régimen permanente $V_c = V_o = cte$) es:

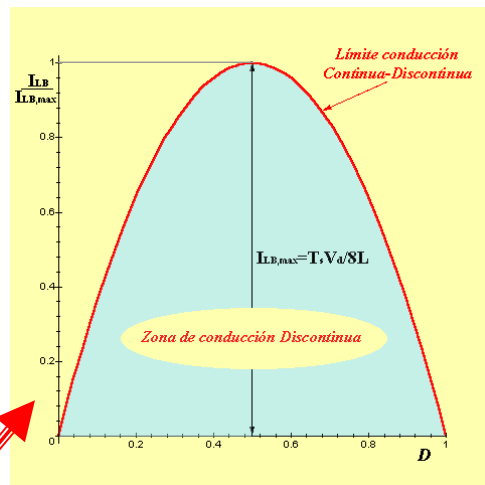
$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,pico} = \frac{t_{on}}{2L} (V_d - V_o) =$$

$$I_{LB} = \frac{T_s V_d}{2L} D(1-D)$$

Su valor Máximo (para $D = 0.5$):

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_d}{8L}$$

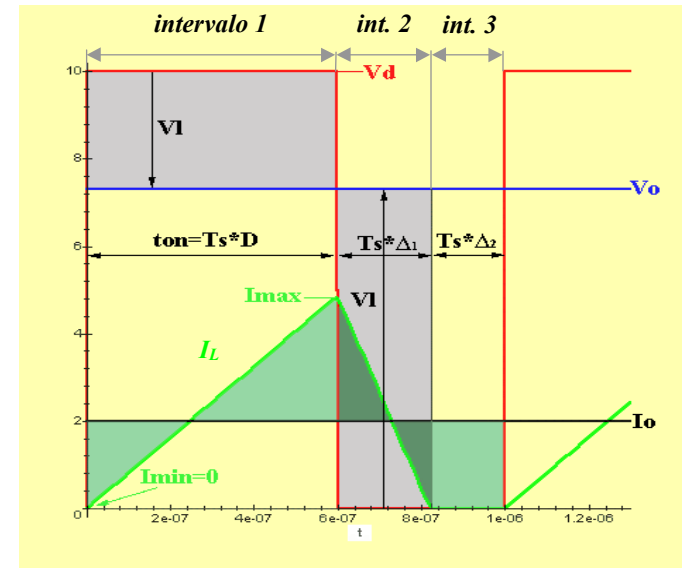
Luego: $I_{LB} = 4I_{LB,max} D(1-D)$



Zonas I_o - D de funcionamiento en modo conducción continua y conducción discontinua

CONVERTIDOR REDUCTOR.

Modo de Conducción Discontinua con V_d Constante



	Intervalo de conducción		
	1	2	3
Inter.	Si	No	No
Diodo	No	Si	No

$$(V_d - V_o)DT_s + (-V_o)\Delta_1 T_s = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1} \text{ donde } D + \Delta_1 < 1.0$$

$$I_{max} = i_{L,pico} = \frac{V_o}{L} \Delta_1 T_s$$

$$I_L = I_o = \frac{1}{T_s} \left(\frac{1}{2} i_{L,pico} (D + \Delta_1) \cdot T_s \right) = i_{L,pico} \frac{D + \Delta_1}{2}$$

Area del triángulo

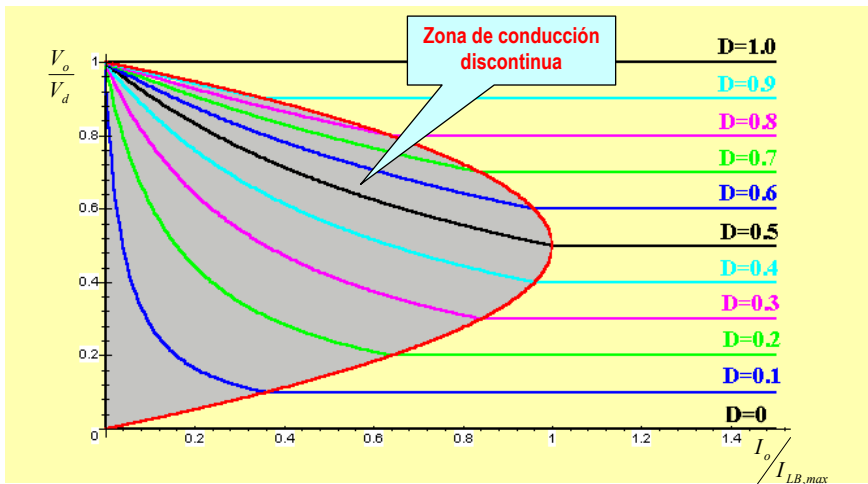
$$I_o = \frac{V_o}{L} \Delta_1 T_s \frac{(D + \Delta_1)}{2} = 4D \cdot I_{LB,max} \Delta_1 \Rightarrow \Delta_1 = \frac{I_o}{4I_{LB,max} D}$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \right)}$$

CONVERTIDOR REDUCTOR.
Relación de transformación con V_d Constante

Ejemplo, control de motores **DC**: Se genera una tensión de salida variable V_o que se aplica al motor **DC** a partir de una tensión de entrada sustancialmente constante V_d .

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{I_o}{I_{LB,max}} \right)}$$



Relación de transformación de un convertidor reductor, en Modos Continuo y Discontinuo con V_d Constante

CONVERTIDOR REDUCTOR.
Modo de Conducción Discontinua con V_o Constante

Ejemplo: fuente de alimentación con V_o constante, a partir de V_d no regulada

Si V_o es constante $V_d=V_o/D$, **en el límite**:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,pico} = \frac{DT_S}{2L} (V_d - V_o) = \frac{T_S V_o}{2L} (1 - D);$$

Sea: $I_{LB,max} = \frac{T_S V_o}{2L}$, (Para $D = 0$) $\Rightarrow I_{LB} = (1 - D) I_{LB,max}$

En **conducción discontinua**:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{D + \Delta_1} \Rightarrow \Delta_1 = D \cdot \left(\frac{V_d}{V_o} - 1 \right)$$

$$i_{L,pico} = \frac{V_o}{L} \Delta_1 T_S ; \quad I_o = i_{L,pico} \frac{D + \Delta_1}{2} = \frac{V_o}{2L} T_S \cdot \Delta_1 (D + \Delta_1)$$

Como:

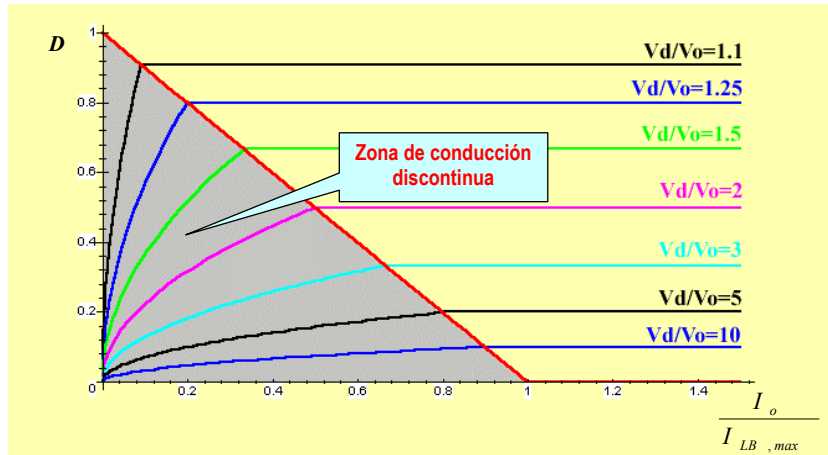
$$I_{LB,max} = \frac{T_S V_o}{2L} \Rightarrow I_o = I_{LB,max} \Delta_1 (D + \Delta_1) = I_{LB,max} D \left(\frac{V_d}{V_o} - 1 \right) \frac{D V_d}{V_o}$$

Despejando D , se obtiene:

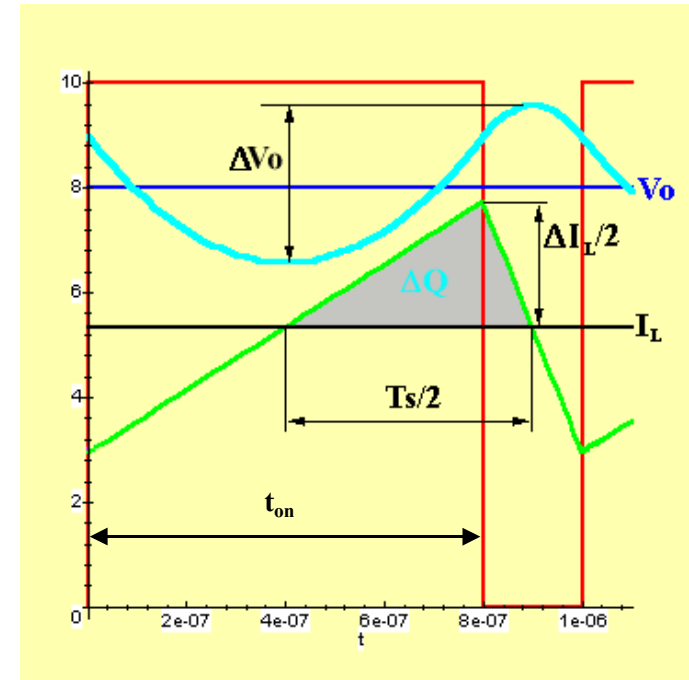
$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o / I_{LB,max}}{1 - V_o / V_d} \right)^{1/2}$$

CONVERTIDOR REDUCTOR.
Relación de transformación con V_o Constante

$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o / I_{LB,max}}{1 - V_o / V_d} \right)^{1/2}$$



CONVERTIDOR REDUCTOR.
Rizado de Tensión a la salida



Suponiendo variaciones de V_o pequeñas (p.ej. 1% de V_o), y se puede suponer que todo el rizado de corriente lo absorbe el condensador de salida C:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \frac{T_s}{2} \right); \text{ (Area del triángulo sombreada)}$$

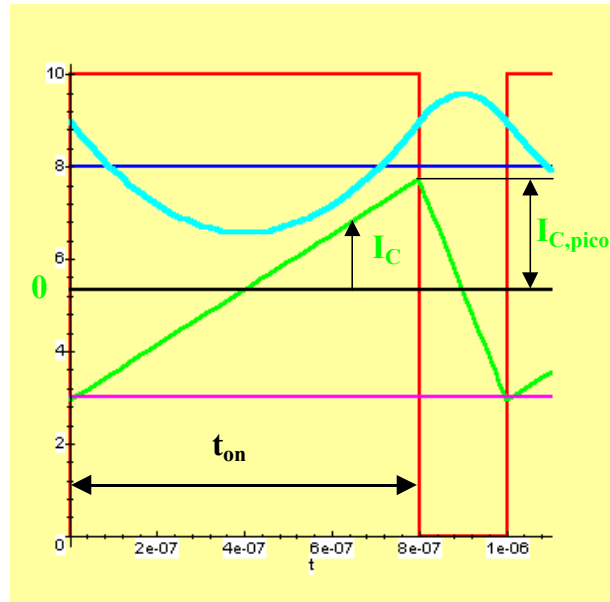
$$\Delta I_L = \frac{V_o}{L} (1 - D) T_s; \text{ (Durante } t_{off})$$

$$\Delta V_o = \frac{T_s}{8C} \frac{V_o}{L} (1 - D) T_s \Rightarrow \frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{T_s (1 - D)}{8LC} = \frac{\pi^2}{2} (1 - D) \left(\frac{f_c}{f_s} \right)^2$$

$$\text{Dónde: } f_s = \frac{1}{T_s} \text{ y } f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Es decir, el rizado de la tensión de salida se puede acotar eligiendo el valor de C

CONVERTIDOR REDUCTOR. Pérdidas en el Condensador



Suponiendo como en el caso anterior variaciones de V_o pequeñas (p.ej. 1% de V_o), se puede suponer que todo el rizado de corriente lo absorbe el condensador de salida C:

La corriente de pico por el condensador será (Calculándola durante t_{off}):

$$I_{C,Pico} = \frac{1}{2} \Delta I_L = \frac{V_o}{2L} (1-D) T_S;$$

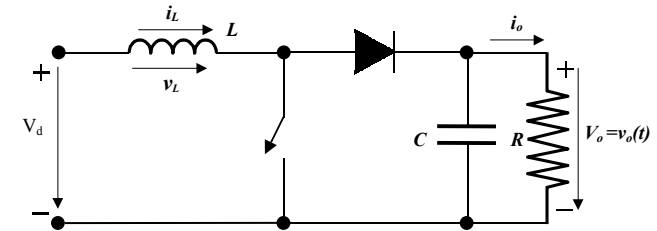
El **valor eficaz de la corriente por el condensador** será (onda triangular):

$$I_{C(RMS)} = \frac{I_{C,Pico}}{\sqrt{3}} = \frac{V_o}{2\sqrt{3}L} (1-D) T_S$$

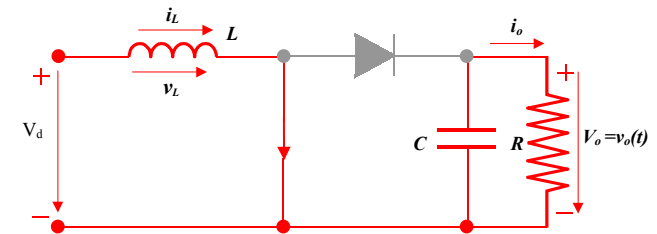
Las **pérdidas en el condensador** se obtienen al multiplicar dicha corriente al cuadrado por la resistencia equivalente serie del condensador (**ESR**).

⇒ Los condensadores de salida deben elegirse con una ESR lo menor posible.

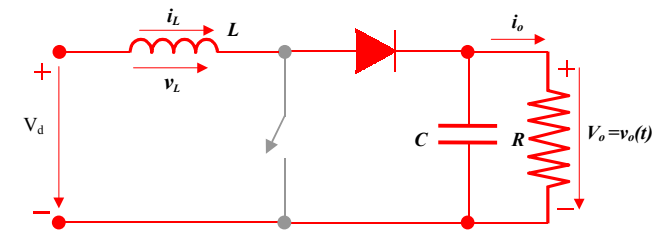
CONVERTIDOR ELEVADOR



Convertidor Conmutado Elevador

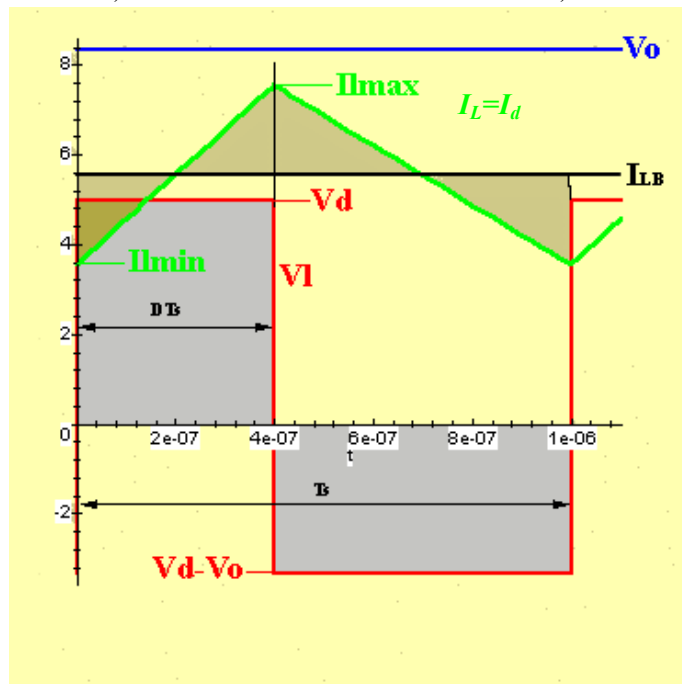
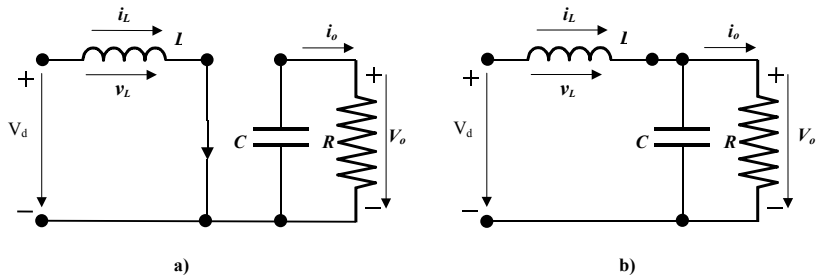


Circuito equivalente con el interruptor cerrado (intervalo de conducción)



Circuito equivalente con el interruptor abierto (intervalo de no conducción)

CONVERTIDOR ELEVADOR Modo de Conducción Continua

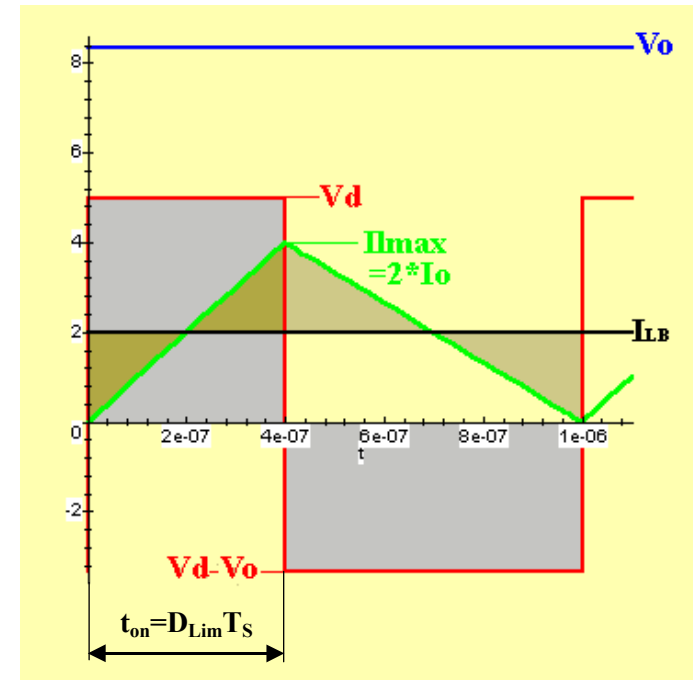


Modo de Conducción Continua. (a) Intervalo de Conducción. (b) Intervalo de no Conducción

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \Rightarrow V_d D + (V_d - V_o) \cdot (1-D) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

CONVERTIDOR ELEVADOR Límite entre modos de Conducción



En el Límite:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,pico} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)$$

Como: $\frac{I_o}{I_d} = 1-D$, será: $I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2$

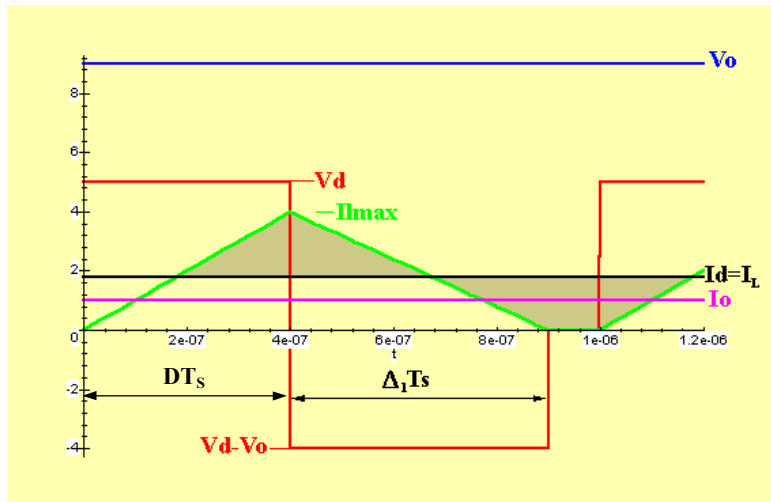
Haciendo: $I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} e$ e $I_{oB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_o}{L}$

$$I_{LB} = 4D(1-D)I_{LB,max}$$

Resulta:

$$I_{oB} = \frac{27}{4} D(1-D)^2 I_{oB,max}$$

CONVERTIDOR ELEVADOR Modo de Conducción Discontinua



$$V_d DT_S + (V_d - V_o) \Delta_1 T_S = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1}$$

El valor medio de la corriente por la bobina (=corriente por la fuente), resulta aplicando: $i_{L,pico} = \frac{T_S V_o}{L} D(1-D)$ y calculando el

área del triángulo: $I_d = \frac{V_d}{2L} DT_S (D + \Delta_1)$

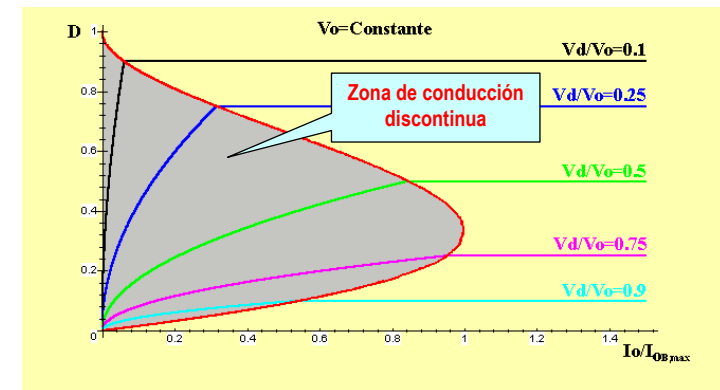
Si no hay pérdidas: $\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D}$ y resulta: $I_o = \left(\frac{T_S V_d}{2L} \right) D \Delta_1$

De las expresiones anteriores, se obtiene:

$$D = \left(\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right)^{1/2}$$

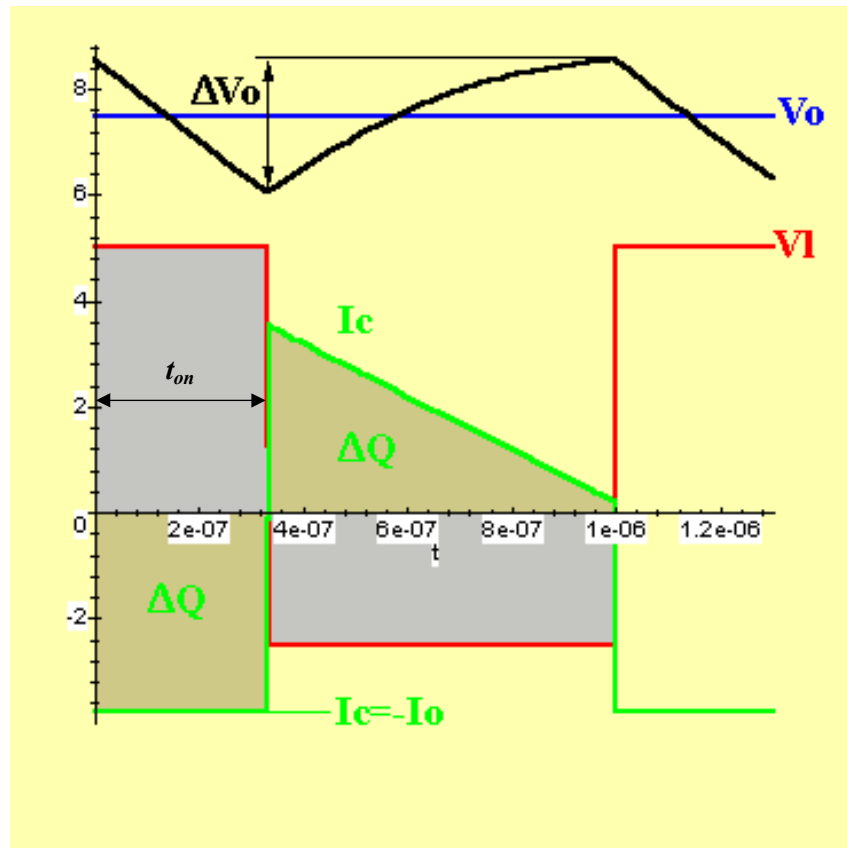
CONVERTIDOR ELEVADOR Relación de transformación con V_d Constante

$$D = \left(\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right)^{1/2}$$



Relación de transformación de un convertidor elevador,
En modos de funcionamiento continuo y discontinuo

CONVERTIDOR ELEVADOR
Rizado de la tensión de salida

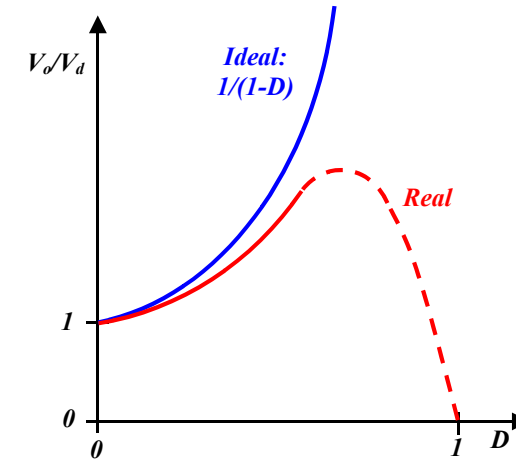


Suponiendo variaciones de V_o pequeñas (p.ej. 1% de V_o), y se puede suponer que todo el rizado de corriente lo absorbe el condensador de salida C :

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} = \frac{V_o DT_s}{RC} ; \text{(Area del rectángulo sombreada)}$$

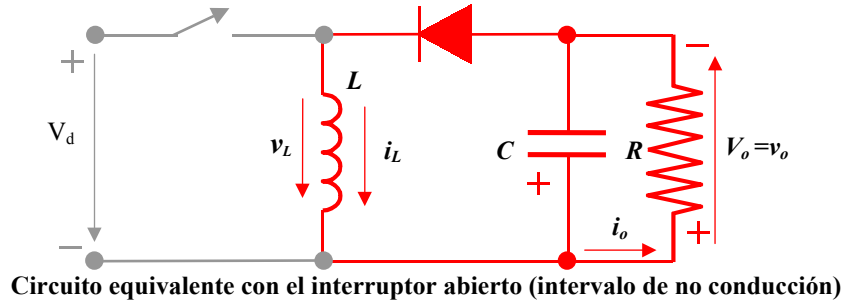
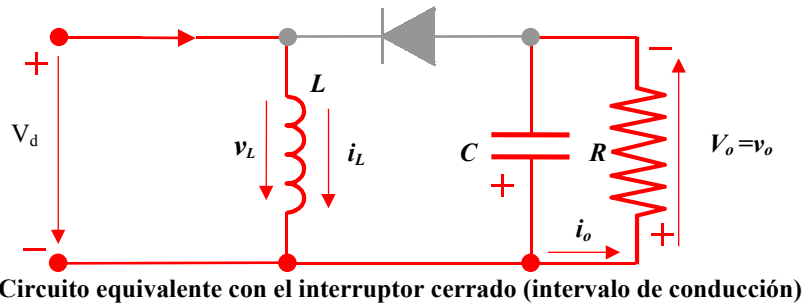
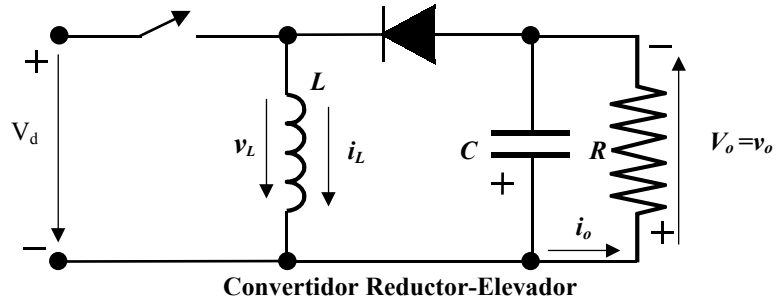
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC} = \frac{DT_s}{\tau} \quad \text{Dónde: } \tau = RC$$

CONVERTIDOR ELEVADOR
Efecto de componentes no ideales

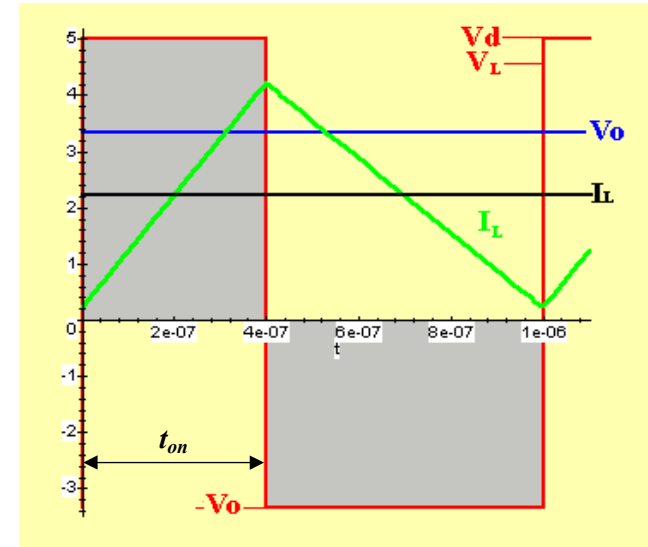
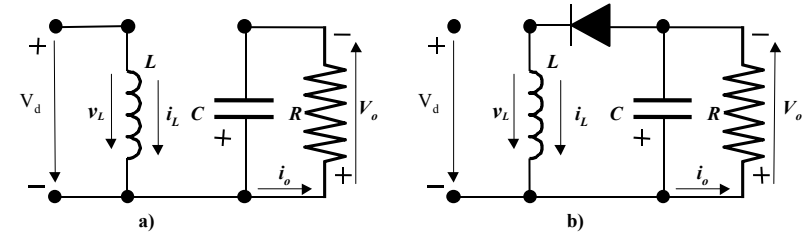


Relación de transformación teniendo en cuenta las pérdidas en los elementos reales (L, Interruptor, Diodo y Condensador)

CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR



CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR. Modo de Conducción Continua



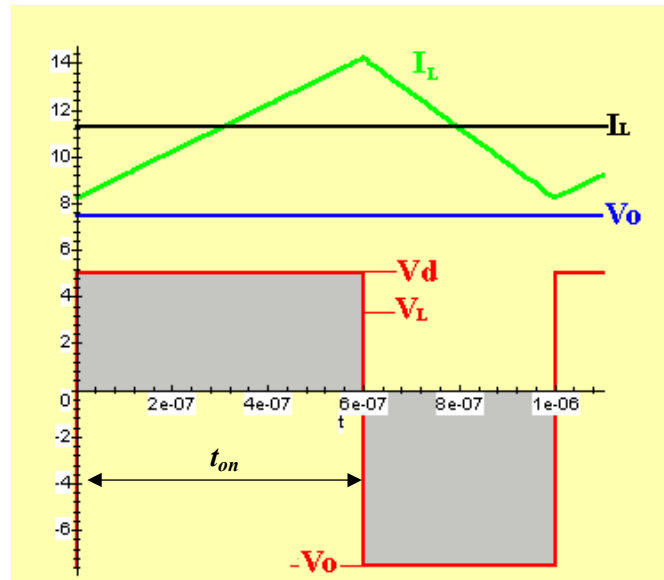
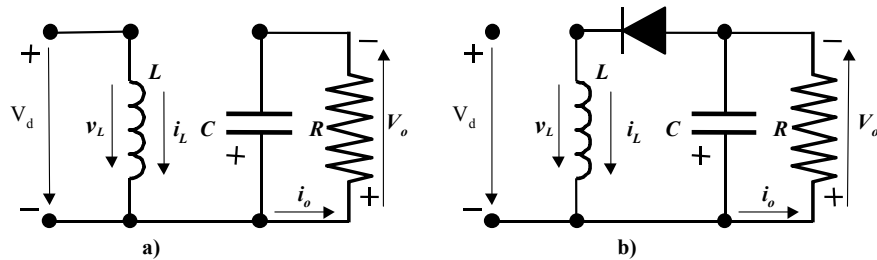
Formas de Onda del Convertidor Reductor-Elevador para Modo de Conducción Continua: $D=0.4$

(a) Intervalo de Conducción. (b) Intervalo de no Conducción

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

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{1 - D}{D}$$

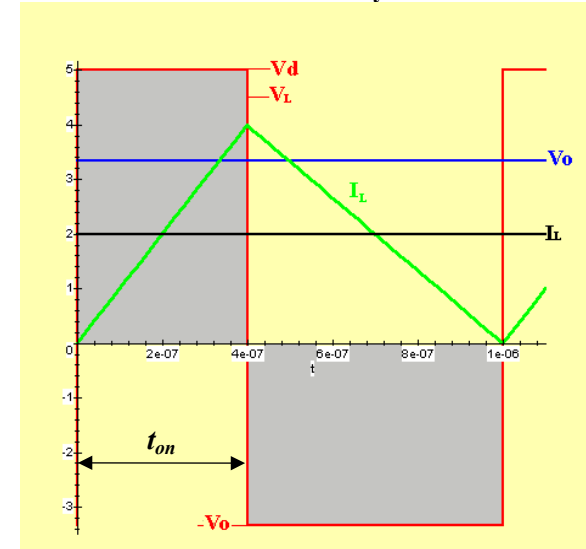
CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Modo de Conducción Continua



Formas de Onda del Convertidor Reductor-Elevador para Modo de Conducción Continua: $D=0.6$

CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Límite entre Modos de conducción

Formas de Onda del Convertidor Reductor-Elevador en el límite entre los modos de Conducción Continua y Discontinua: $D=0.4$



En el Límite:

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,pico} = \frac{T_S V_d}{2L} D \Rightarrow I_{LB} = \frac{T_S V_o}{2L} (1-D),$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D} \\ I_L = I_d + I_o \end{array} \right\} \Rightarrow I_o = I_L (1-D) \Rightarrow I_{oB} = \frac{T_S V_o}{2L} (1-D)^2$$

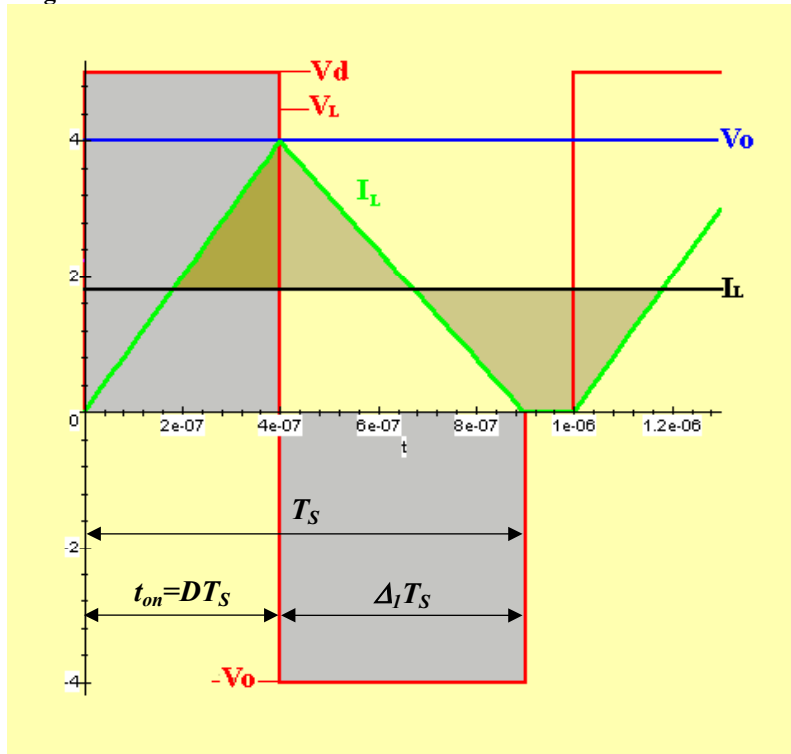
Definiendo:

$$I_{LB,max} = \frac{T_S V_o}{2L} \text{ e } I_{oB,max} = \frac{T_S V_o}{2L}, \text{ resulta:}$$

$$I_{LB} = (1-D) I_{LB,max} \text{ e } I_{oB} = (1-D)^2 I_{oB,max}$$

CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Modo de Conducción Discontinua

Regulador elevador-reductor: Modo de Conducción Discontinua $D=0.4$



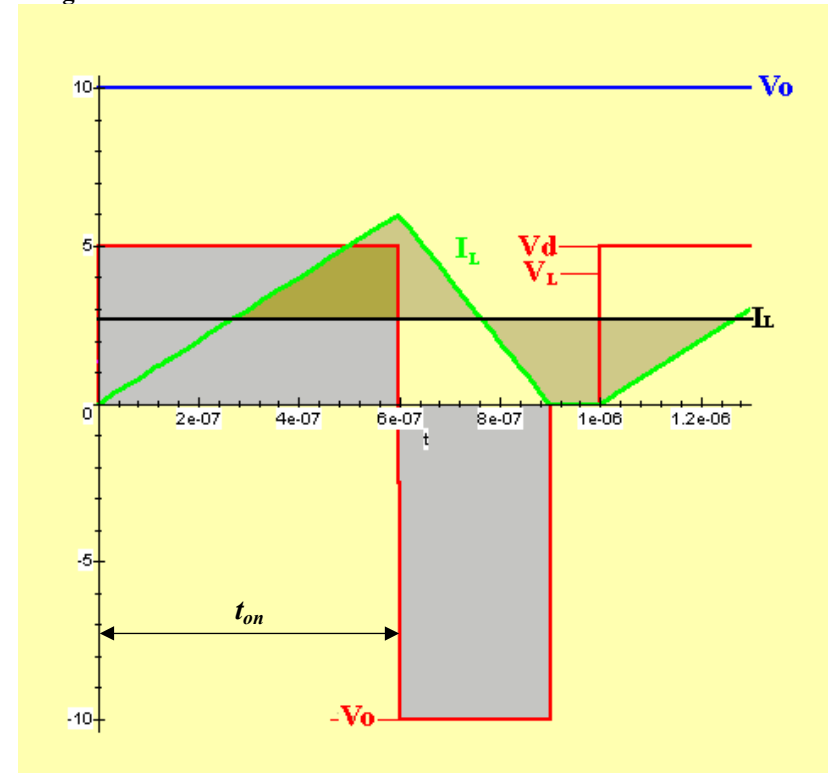
$$V_d DT_S + (-V_o) \Delta_1 T_S = 0 \Rightarrow \frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{\Delta_1} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{D}$$

$$I_L = \frac{V_d}{2L} DT_S (D + \Delta_1)$$

$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o}{I_{oB,max}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

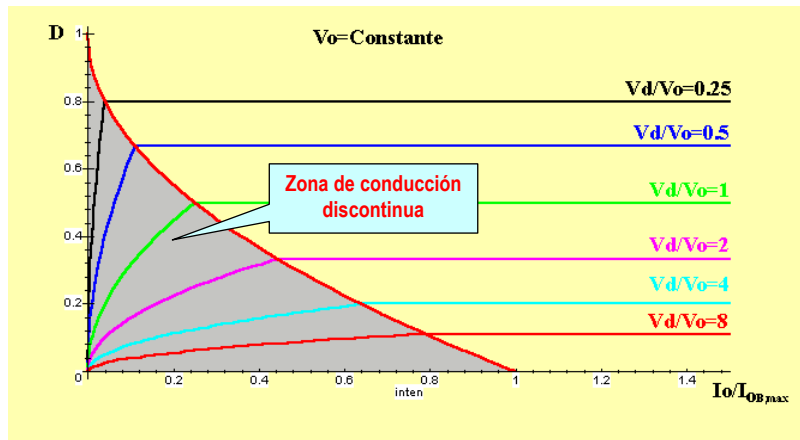
CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Modo de Conducción Discontinua

Regulador elevador-reductor: Modo de Conducción Discontinua $D=0.6$



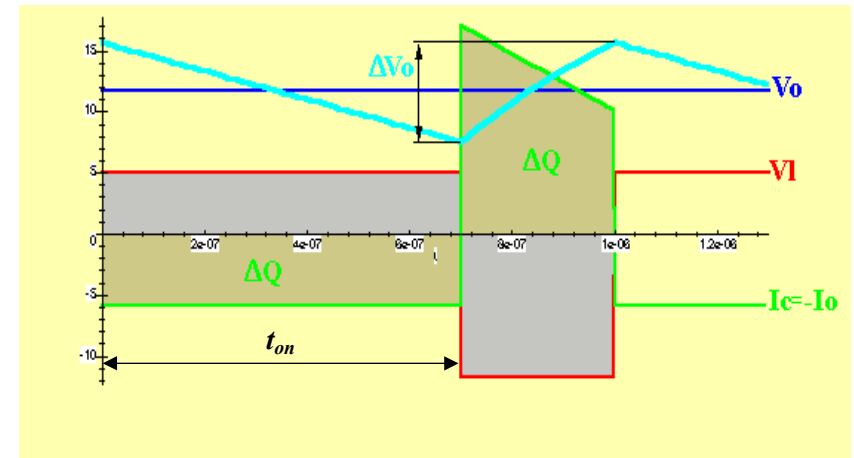
CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Relación de transformación con V_d Constante

$$D = \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{I_o}{I_{oB,max}} \right)^{\frac{1}{2}}$$



Relación de transformación de un convertidor reductor-elevador, en modos de funcionamiento continuo y discontinuo

CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR.
Rizado de la tensión de salida



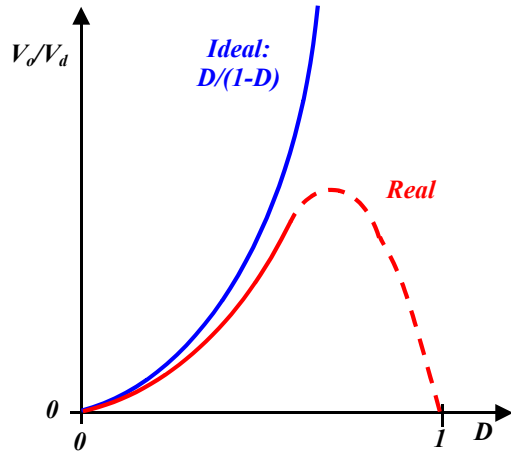
Suponiendo variaciones de V_o pequeñas (p.ej. 1% de V_o), y se puede suponer que todo el rizado de corriente lo absorbe el condensador de salida C :

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} = \frac{V_o DT_s}{RC} ; \text{(Area del rectángulo sombreada)}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT_s}{RC} = \frac{DT_s}{\tau} \quad \text{Dónde: } \tau = RC$$

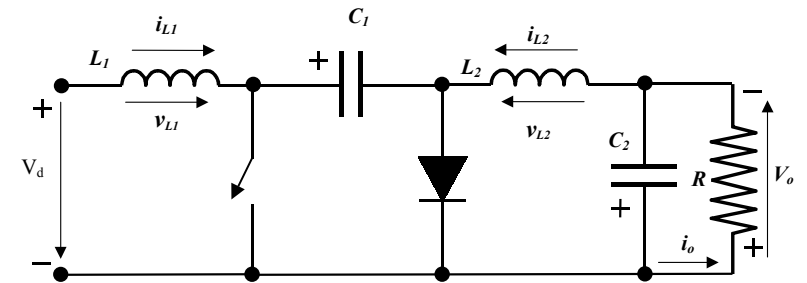
CONVERTIDOR REDUCTOR-ELEVADOR

Efecto de componentes no ideales

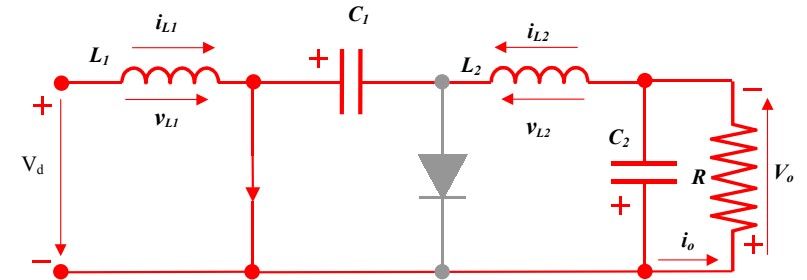


Relación de transformación teniendo en cuenta las pérdidas en los elementos reales (L, Interruptor, Diodo y Condensador)

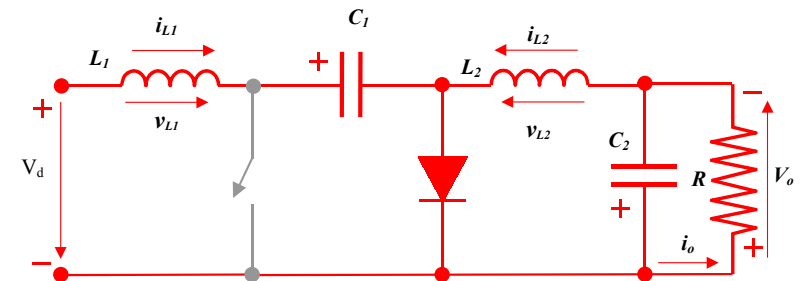
CONVERTIDOR DE CÚK



En régimen permanente, los valores medios de las tensiones en las bobinas es cero, luego será: $V_{C1} = V_d + V_o$, si C es suficientemente grande, V_{C1} se puede considerar constante.

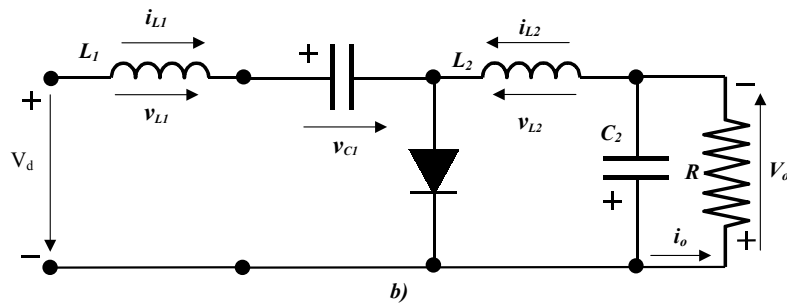
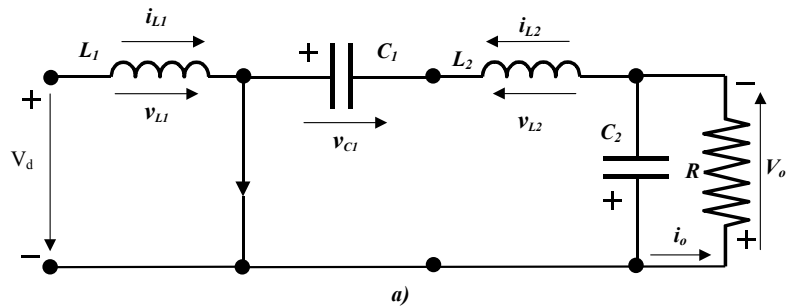


Circuito equivalente con el interruptor cerrado (intervalo de conducción)



Circuito equivalente con el interruptor abierto (intervalo de no conducción)

CONVERTIDOR DE CÚK



Circuitos equivalentes en el funcionamiento por intervalos del Convertidor Cúk. (a) Intervalo de no Conducción. (b) Intervalo de Conducción

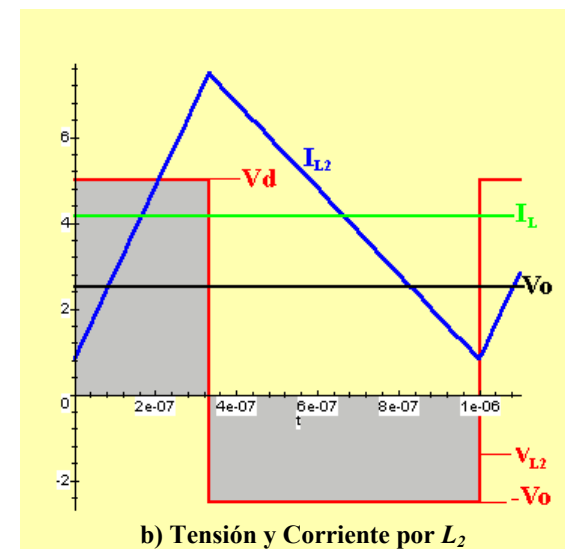
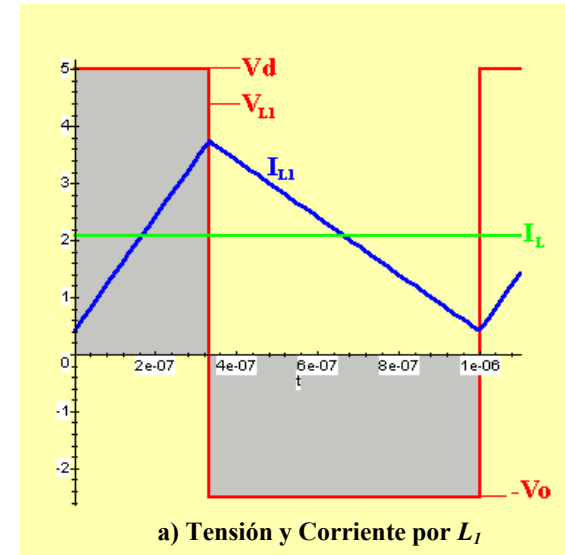
$$L_1: V_d DT_S + (V_d - V_{C1})(1-D)T_S = 0 \Rightarrow \frac{V_{C1}}{V_d} = \frac{1}{1-D}$$

$$L_2: (V_{C1} - V_o)DT_S + (-V_o)(1-D)T_S = 0 \Rightarrow \frac{V_{C1}}{V_o} = \frac{1}{D}$$

donde $I_{L1} = I_d$ Luego: $\frac{V_o}{V_d} = \frac{D}{1-D}$ y $\frac{I_o}{I_d} = \frac{1-D}{D}$
 $I_{L2} = I_o$

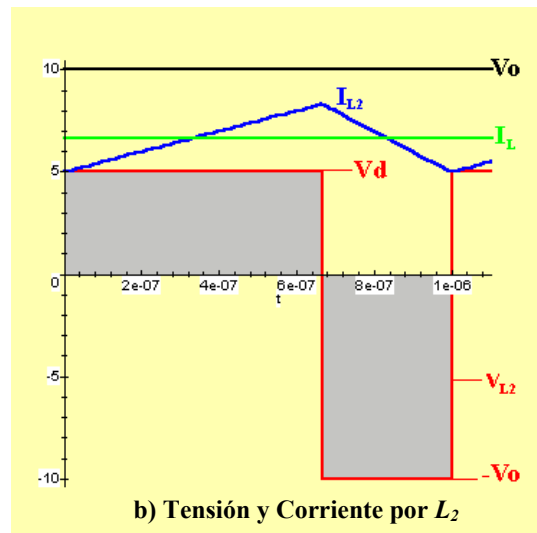
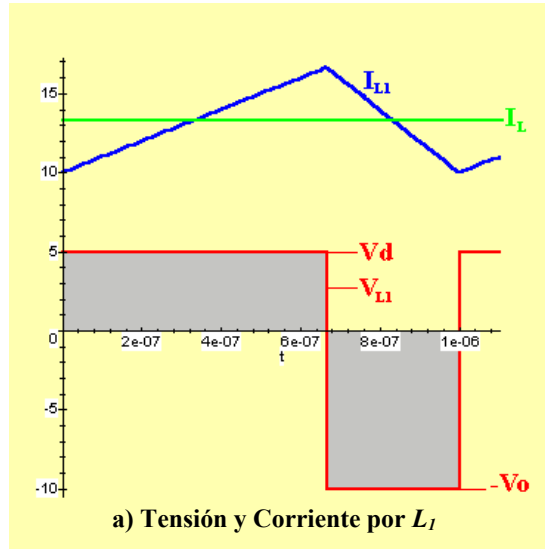
CONVERTIDOR DE CÚK. Modo de Conducción Continua

Convertidor de Cúk: Modo de conducción Continua. $D=0.33$



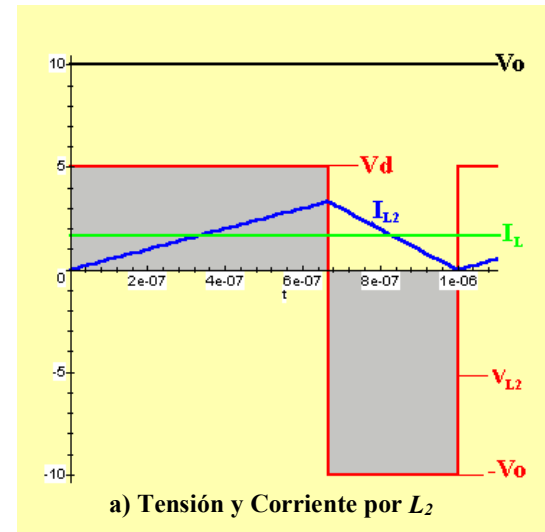
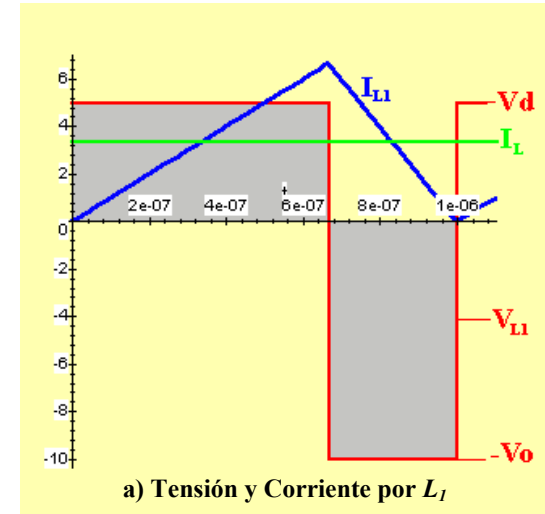
CONVERTIDOR DE CÚK.
Modo de Conducción Continua

Convertidor de Cúk: Modo de conducción Continua. $D=0.66$

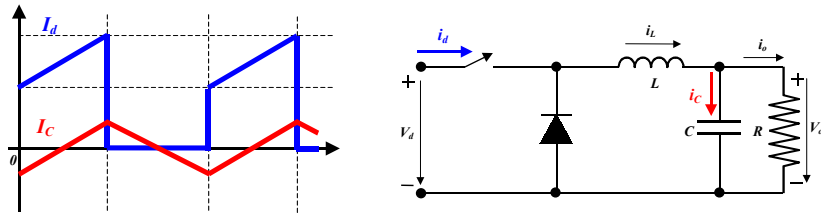


CONVERTIDOR DE CÚK.
Límite entre Modos de Conducción

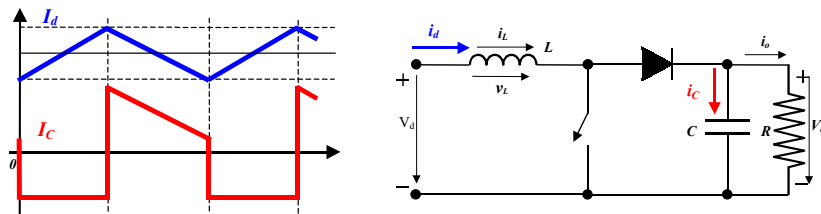
Convertidor de Cúk: Límite conducción Continua-Discontinua. $D=0.66$



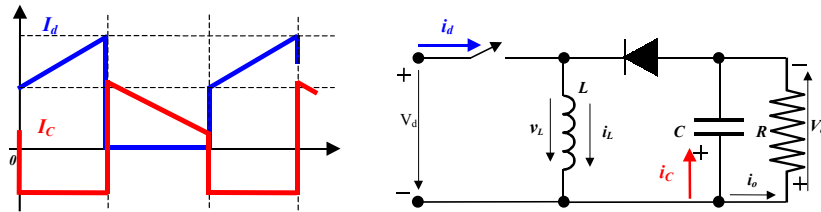
COMPARACIÓN ENTRE CONVERTIDORES



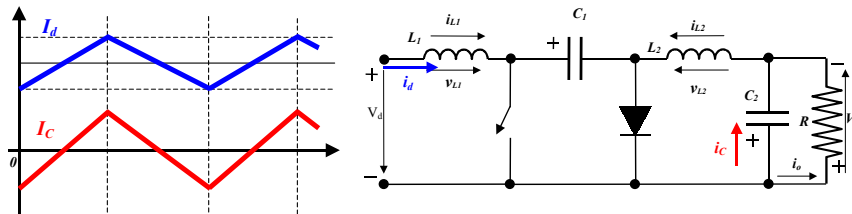
Convertidor Reductor: $V_o = DV_d$; $I_o = I_L = I_d/D$



Convertidor Elevador: $V_o = V_d/(1-D)$; $I_d = I_L = I_o/(1-D)$



Convertidor Reductor-Elevador: $V_o = V_d D/(1-D)$; $I_d = I_o D/(1-D)$; $I_L = I_o/(1-D)$



Convertidor de Cük: $V_o = V_d D/(1-D)$; $I_d = I_{L1} = I_o D/(1-D)$; $I_{L2} = I_o$