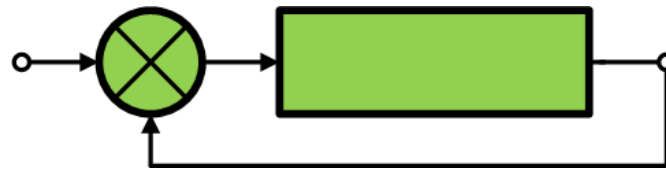




UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN



ÁREA CONTROL  
ASIGNATURA:  
SISTEMAS DE CONTROL



CONTROL DE CONVERTIDORES CONMUTADOS DC/DC

PARTE 1: TOPOLOGÍAS Y COMPONENTES

☐ Genéricamente, los convertidores conmutados son sistemas electrónicos orientados a las transformaciones eficientes de energía según un método de control:

☐ Eléctrica ↔ Eléctrica

☐ Eléctrica ↔ Mecánica

☐ La modelización de los procesos de conversión de energía involucra la caracterización de plantas no LTI, particularmente, de estructura variable en el tiempo.

### MOTIVACIÓN:

☐ Introducción a topologías y componentes de convertidores de potencia DC/DC

☐ Desarrollo de métodos de modelización de plantas de estructura topológica variable

☐ Compensación, control y performance en sistemas de estructura variable

### APLICACIONES TÍPICAS:

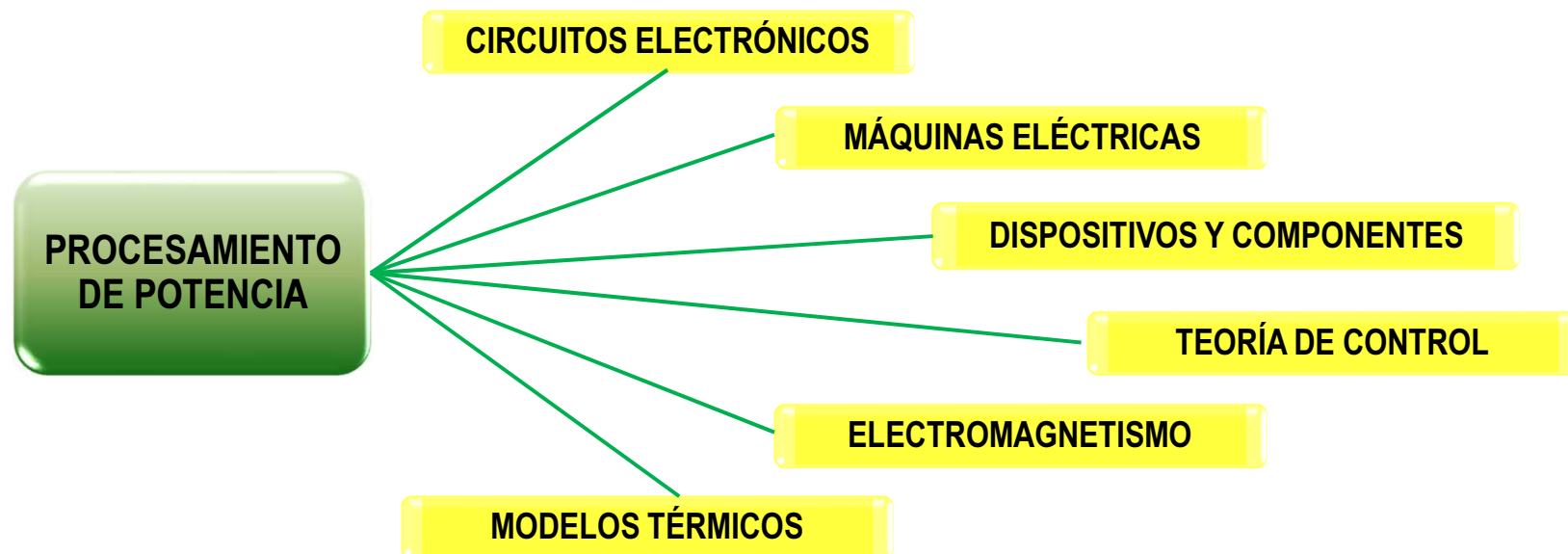
☐ Cargadores / descargadores de baterías

☐ Convertidores DC/DC on board y reguladores de potencia

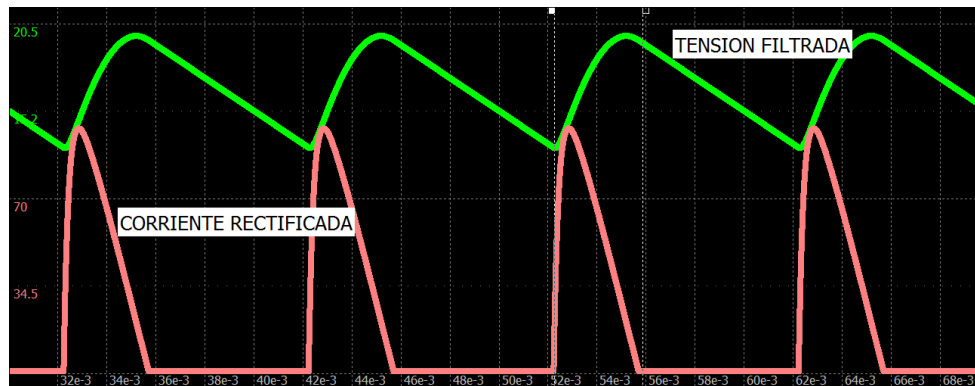
## ORGANIZACIÓN:

- ❑ Sesión 1: Componentes en conversión de potencia, topologías fundamentales
- ❑ Sesión 2: Modelación de convertidores DC/DC y control en lazo cerrado para performance
- ❑ Sesión 3: Simulación de convertidores DC/DC (LTSpice / MtLab / NL5)
- ❑ Sesión 4: Proyecto de diseño de un convertidor DC/DC
- ❑ Sesión 5: Problemas de compensación mediante promediación de estados

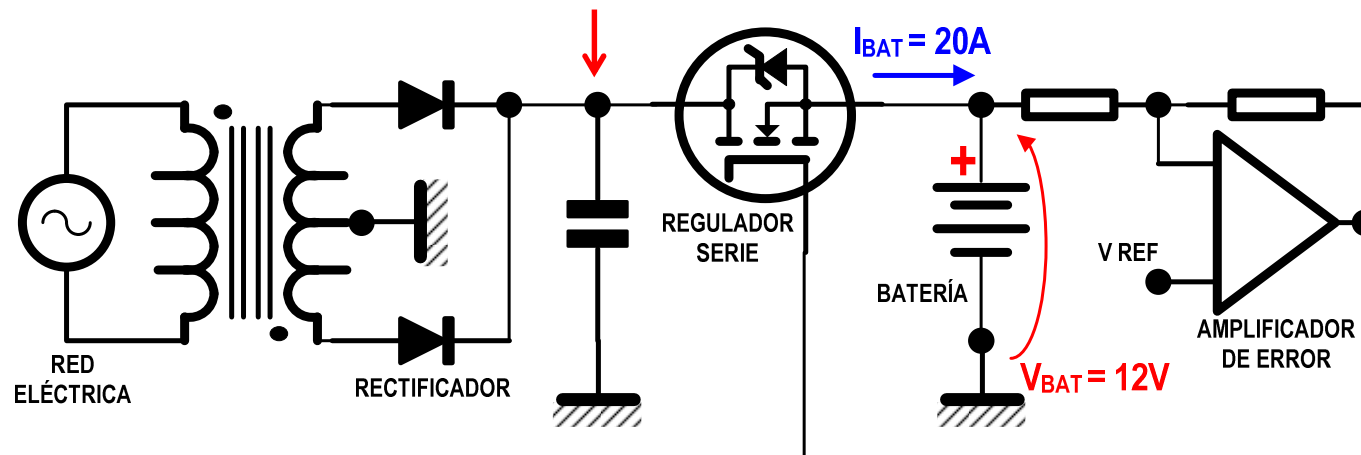
## COMPETENCIAS REQUERIDAS EN LA TEMÁTICA:



## EJEMPLO: ANATOMÍA DE UN REGULADOR (CUASI) LINEAL PARA CARGAR BATERÍAS



Tensión de salida: 12V...(13.8V)  
 Corriente de carga máxima=20A  
 Tensión de línea= 220Vrms +/-10%  
 $P_o=240W...276W$



- ☐ Cuánto disipa el transistor en el peor caso ?
- ☐ Cuánto resulta la eficiencia (aprox.) ?
- ☐ Cómo es la corriente de red ?
- ☐ Cuánto vale la potencia aparente de red ?



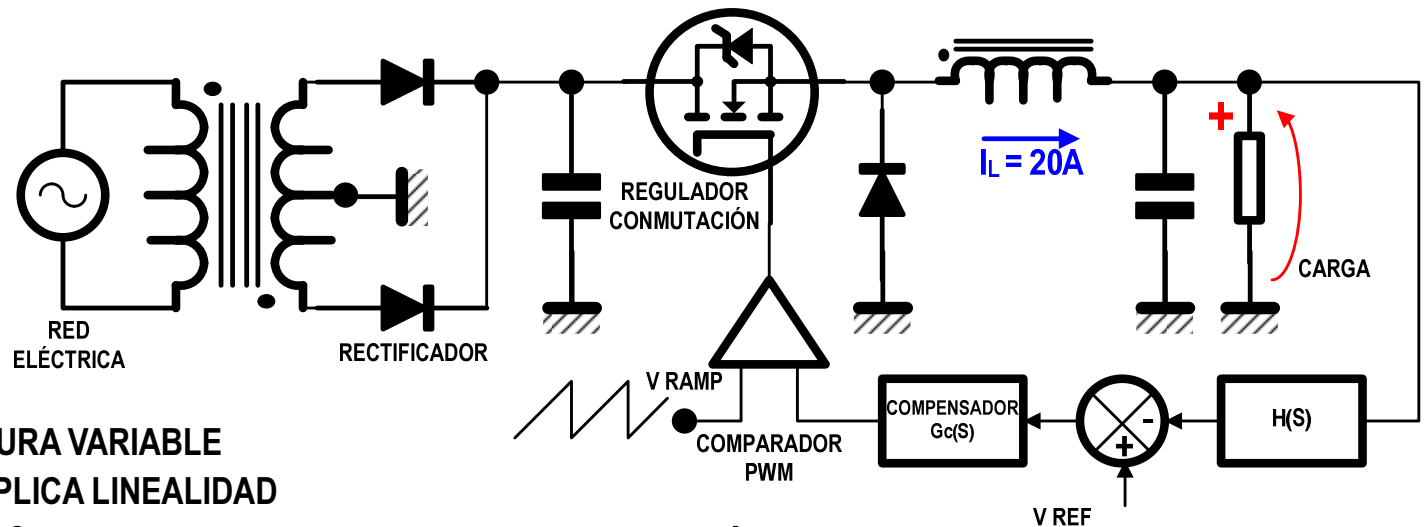
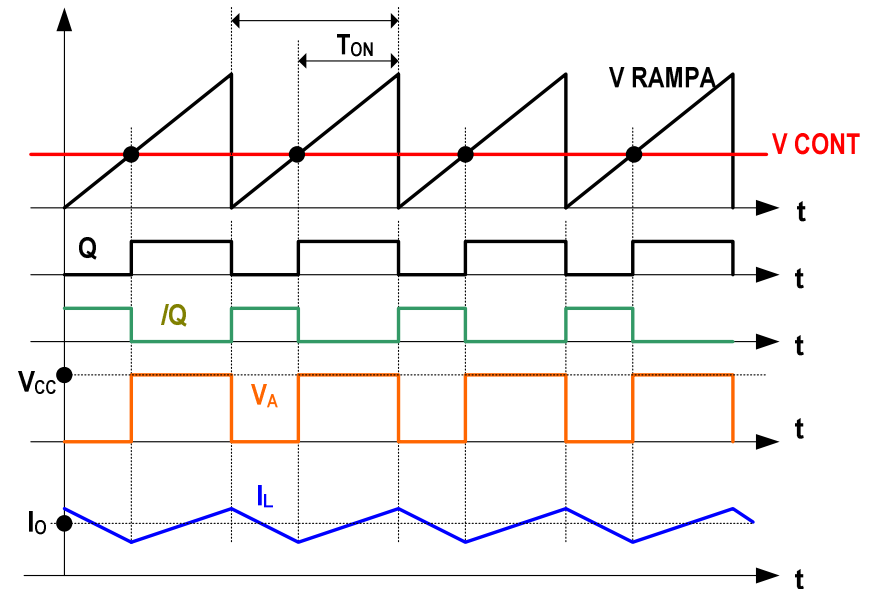
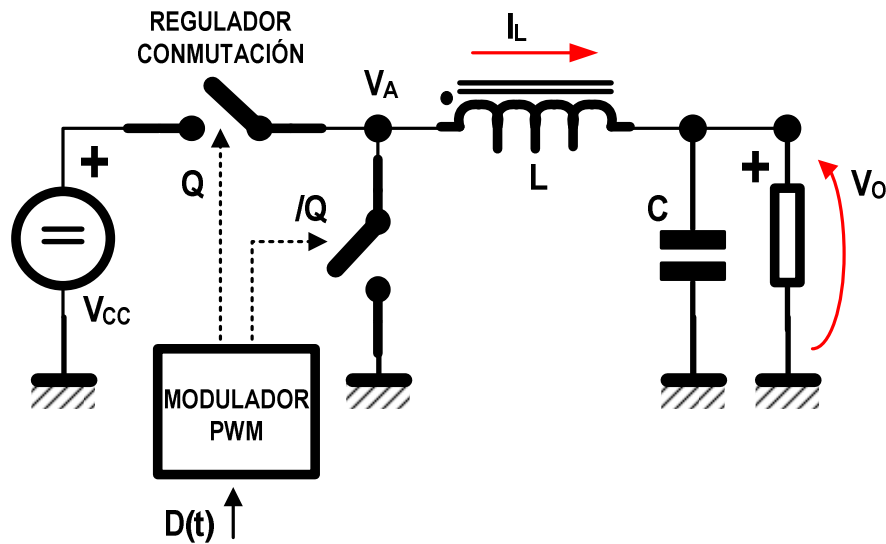
$$156W < P_D < 340W$$

$$0.41 < \eta < 0.64$$

$$762VA < S < 960VA$$



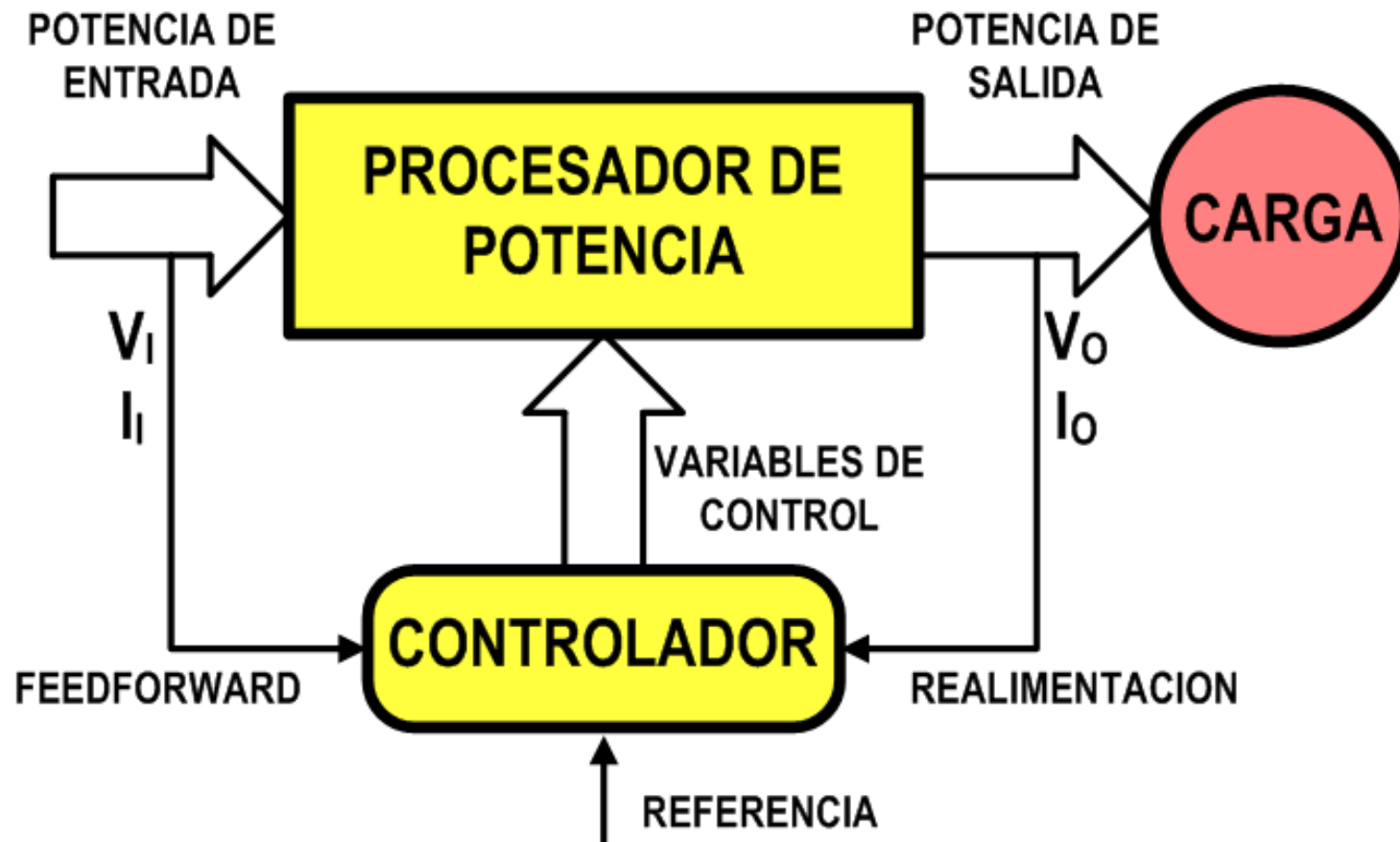
## EJEMPLO: ALTERNATIVA DE CONVERTIDOR CONMUTADO PARA CARGAR BATERÍAS



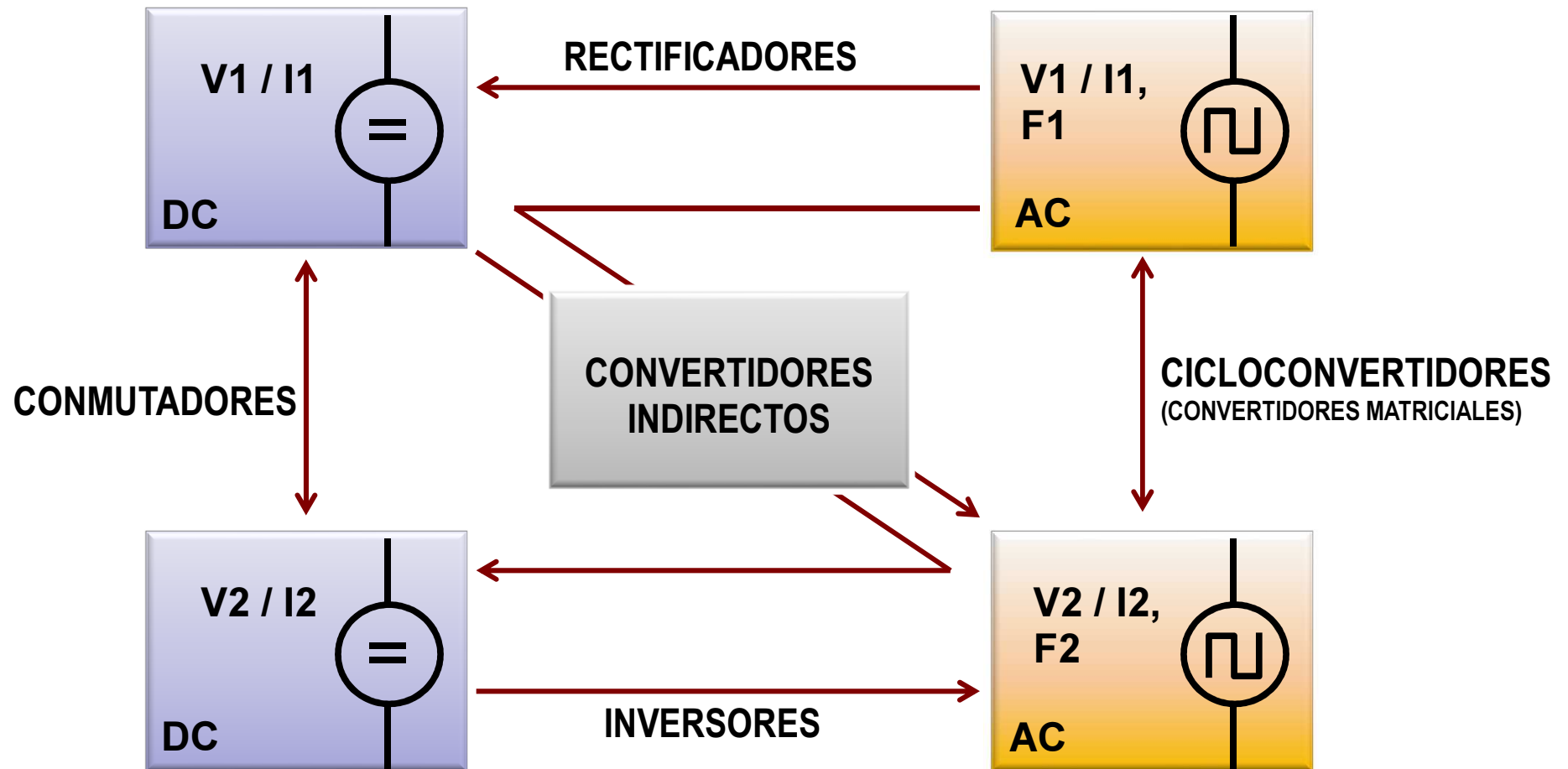
IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL

- ❑ SISTEMA DE ESTRUCTURA VARIABLE
- ❑ DOS ENTRADAS, NO APLICA LINEALIDAD
- ❑ MODELO DE CONTROL ?

## MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE ESTRUCTURA VARIABLE:

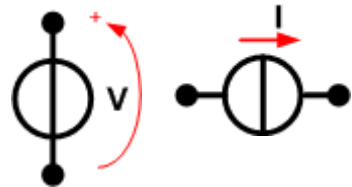


## CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE CONVERSIÓN:



**CONVERSION ESTÁTICA DE ENERGÍA ELÉCTRICA:** Transformación de parámetros y características de la energía eléctrica suministrada por un generador, para adaptarlos a una aplicación particular (receptor o carga), empleando un conjunto de elementos eléctricos estáticos, interconectados por mallas circuitales de estructura variable.

## COMPONENTES DE LAS ESTRUCTURAS DE CONVERSIÓN:



GENERADORES



INTERRUPTORES  
(SEMICONDUCTORES)

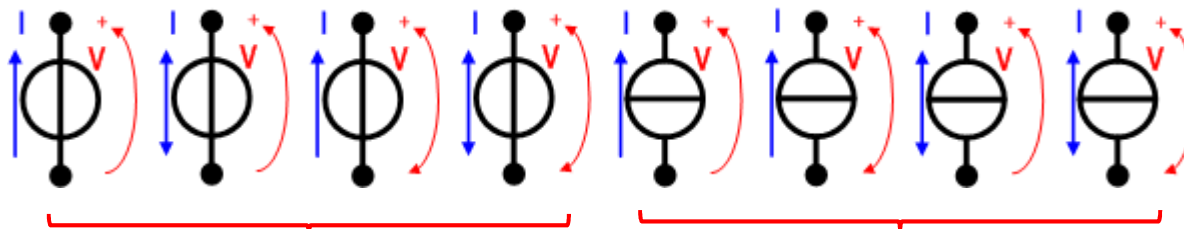


ELEMENTOS  
REACTIVOS



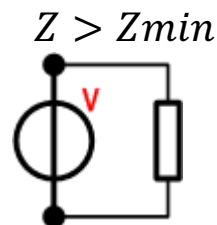
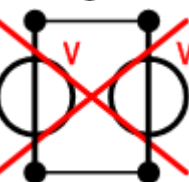
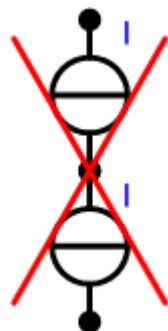
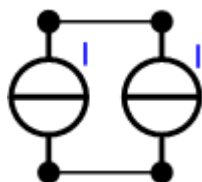
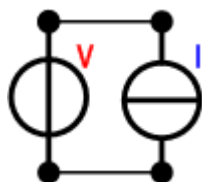
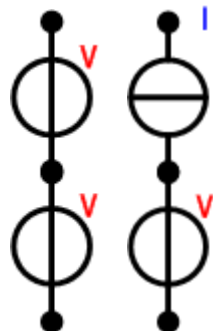
TRANSFORMADORES

## COMPONENTES: GENERADORES

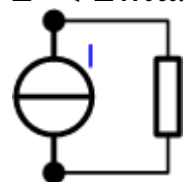


TENSION

CORRIENTE



$Z < Z_{max}$



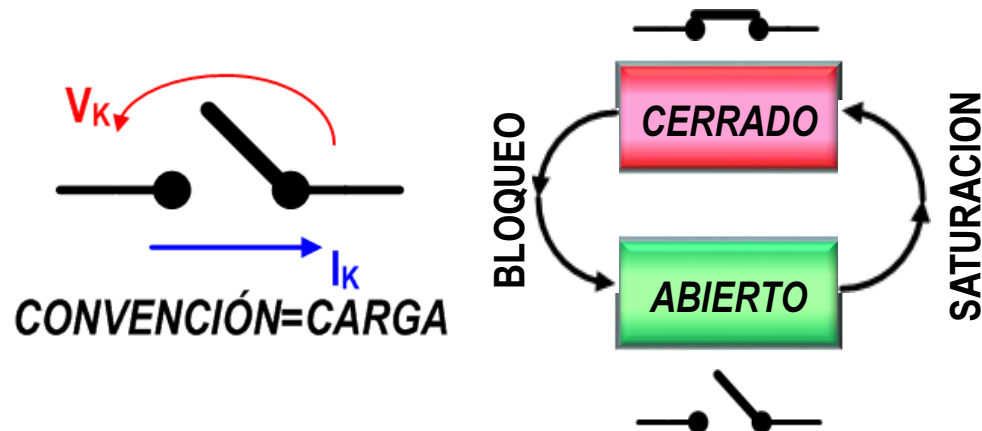
### Propiedades:

Tipo: tensión / Corriente  
Sentido: AC / DC  
Reversibilidad energética  
Impedancia Instantánea.

- UNA FUENTE DE TENSIÓN NO PUEDE CORTOCIRCUITARSE
- UNA FUENTE DE CORRIENTE NO PUEDE DEJARSE A CIRCUITO ABIERTO
- DOS FUENTES DE TENSIÓN NO PUEDEN CONECTARSE EN PARALELO
- DOS FUENTES DE CORRIENTE NO PUEDEN CONECTARSE EN SERIE



## COMPONENTES: INTERRUPTORES (NOCIÓN)



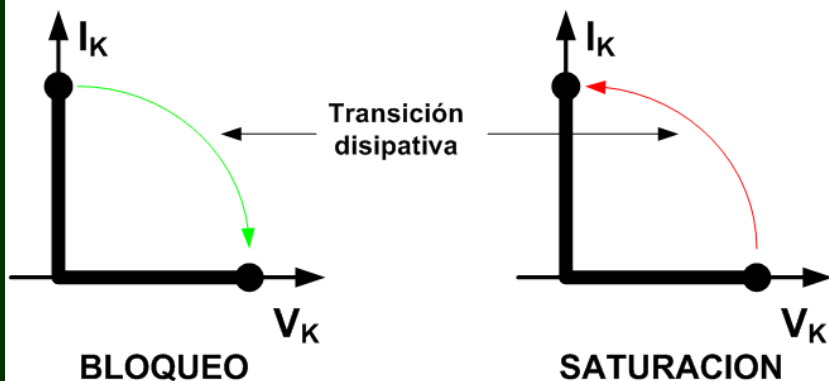
$V_K \cdot I_K > 0$  CONMUTACION COMANDADA

*La conmutación comandada del interruptor modifica la topología del circuito externo*

$V_K \cdot I_K < 0$  CONMUTACION NATURAL

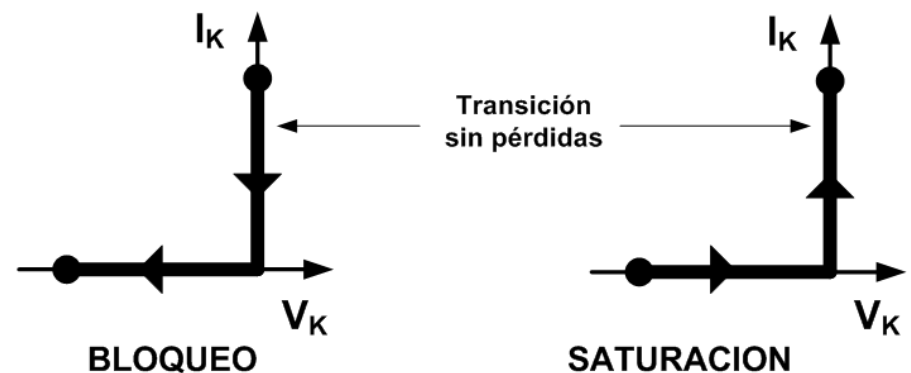
*El circuito externo provoca la conmutación del interruptor y luego cambia su topología*

### CONMUTACION COMANDADA (Interruptores con electrodo de comando)



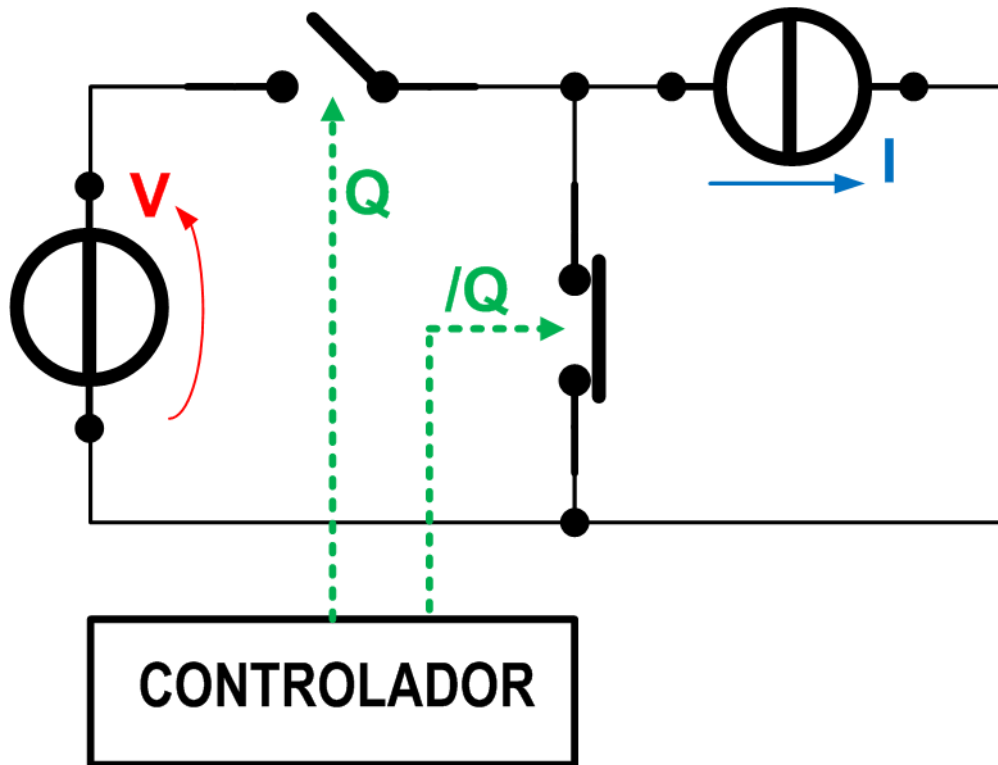
PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO ANTES Y DESPUES DE LA CONMUTACION  
SOBRE SEGMENTOS ORTOGONALES DEL MISMO SIGNO !

### CONMUTACION NATURAL (ESPONTANEA) (Interruptores sin electrodo de comando)



PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO ANTES Y DESPUES DE LA CONMUTACION  
SOBRE SEGMENTOS ORTOGONALES DE SIGNO CONTRARIO!

## COMPONENTES: CÉLULA ELEMENTAL DE CONMUTACIÓN

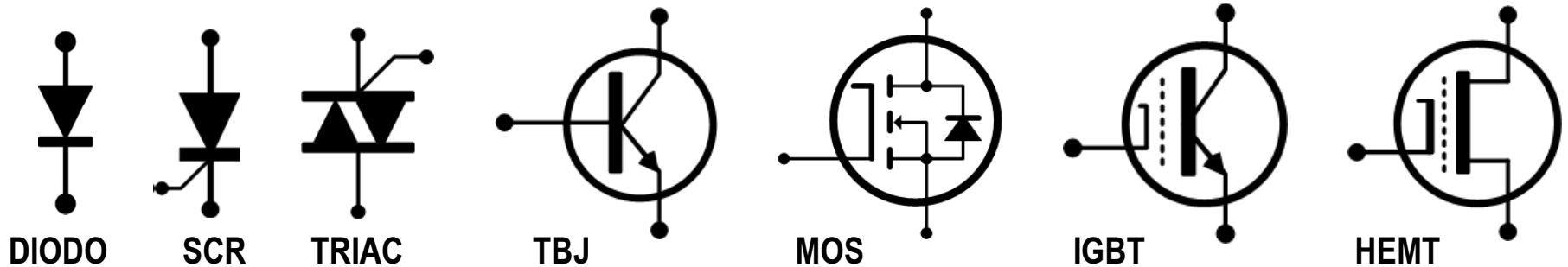


- UNA FUENTE DE TENSIÓN NO PUEDE CORTOCIRCUITARSE
- UNA FUENTE DE CORRIENTE NO PUEDE DEJARSE A CIRCUITO ABIERTO
- DOS FUENTES DE TENSIÓN NO PUEDEN CONECTARSE EN PARALELO
- DOS FUENTES DE CORRIENTE NO PUEDEN CONECTARSE EN SERIE

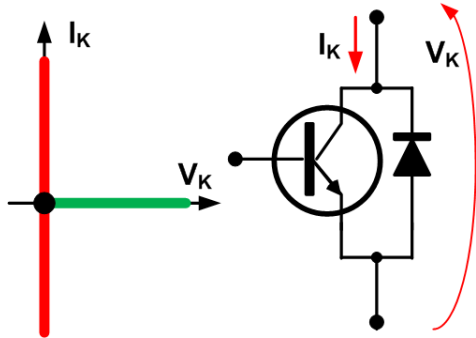
### CARACTERÍSTICAS:

- ❑ CONEXIÓN DE UNA FUENTE DE TENSIÓN CON UNA DE CORRIENTE
- ❑ OPERACIÓN DE LOS INTERRUPTORES FORZOSAMENTE COMPLEMENTARIA
- ❑ UN CAPACITOR SE COMPORTA TRANSITORIAMENTE COMO UNA FUENTE DE TENSIÓN
- ❑ UN INDUCTOR SE COMPORTA TRANSITORIAMENTE COMO UN GENERADOR DE CORRIENTE
- ❑ LAS TRES TOPOLOGÍAS BÁSICAS DE CONVERSIÓN SE OBTIENEN POR ROTACIONES DE LA CÉLULA ELEMENTAL

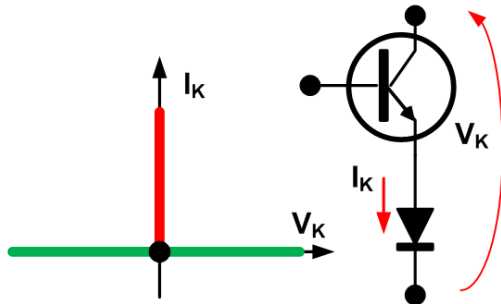
## COMPONENTES: INTERRUPTORES (REALIZACIÓN)



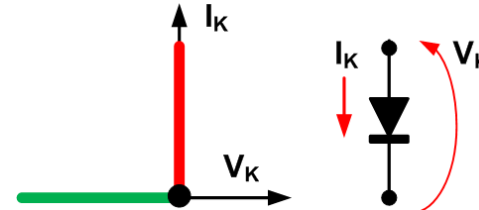
INTERRUPTOR DE DOS CUADRANTES  
BIDIRECCIONAL EN CORRIENTE  
UNIDIRECCIONAL EN TENSIÓN



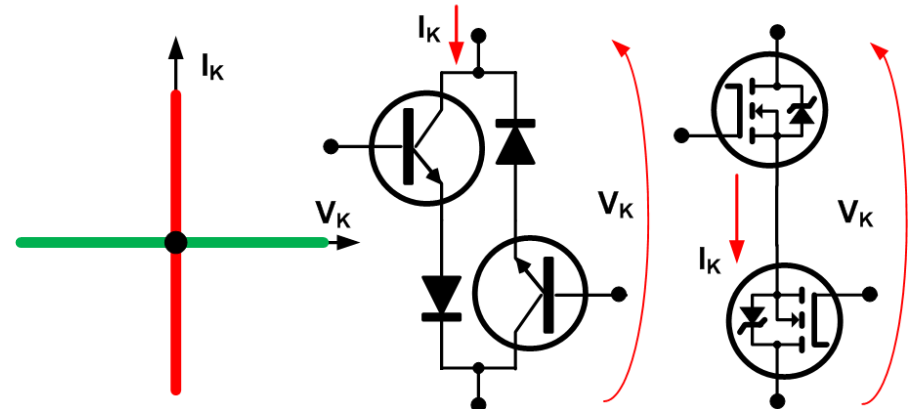
INTERRUPTOR DE DOS CUADRANTES  
BIDIRECCIONAL EN TENSION  
UNIDIRECCIONAL EN CORRIENTE



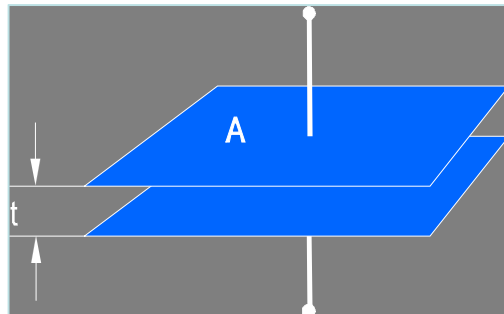
INTERRUPTOR DE UN CUADRANTE  
UNIDIRECCIONAL EN CORRIENTE  
UNIDIRECCIONAL EN TENSIÓN



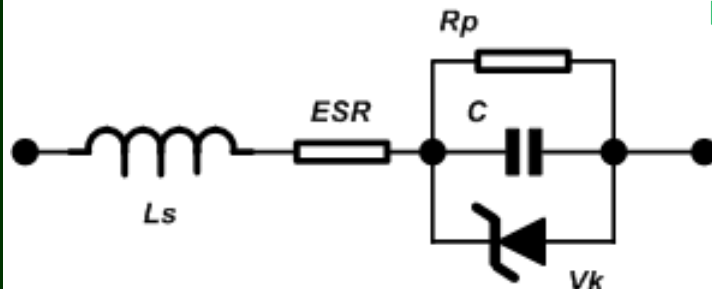
INTERRUPTORES DE CUATRO CUADRANTES  
BIDIRECCIONALES EN TENSION – BIDIRECCIONALES EN CORRIENTE



## COMPONENTES: CAPACITORES



$$C = Q / V = \epsilon \cdot A / t$$



### MODELO EQUIVALENTE

- $L_s$  = Inductancia serie
- $C$  = Capacidad efectiva
- $ESR$  = Resistencia serie efectiva ( $R_s$ )
- $V_k$  = Tensión de avalancha
- $R_p$  = Resistencia de fugas

### CARACTERÍSTICAS:

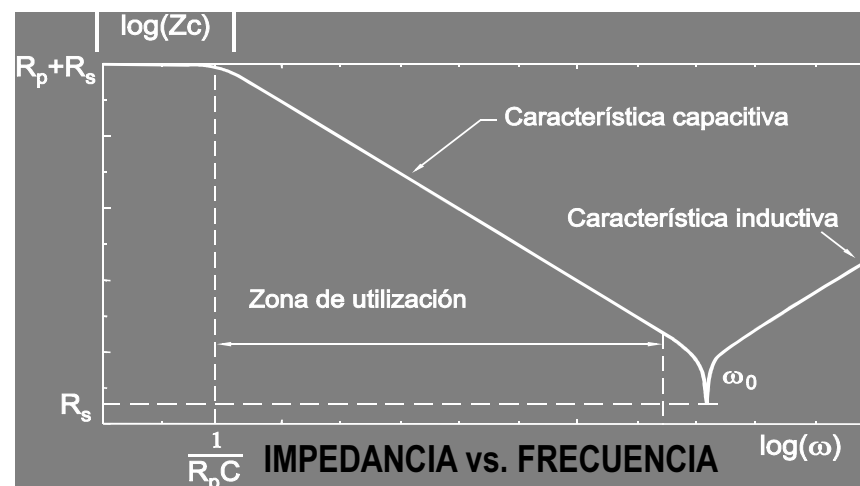
- CAPACIDAD
- TENSIÓN DE OPERACIÓN
- VOLUMEN
- PÉRDIDAS (JOULE + DIELECTRICAS)
- MÁXIMA CORRIENTE
- VIDA ÚTIL (MTBF)
- IMPEDANCIA EFECTIVA
- TEMPERATURA DE TRABAJO
- MODO DE FALLA
- CORRIENTE DE FUGA

### TECNOLOGÍA:

- MULTICAPA
- ELECTROLÍTICOS
- PELÍCULA METÁLICA
- DIELECTRICO METALIZADO
- EDLC (SUPERCAPACITORES)

### DIELECTRICO:

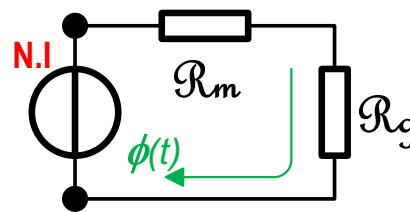
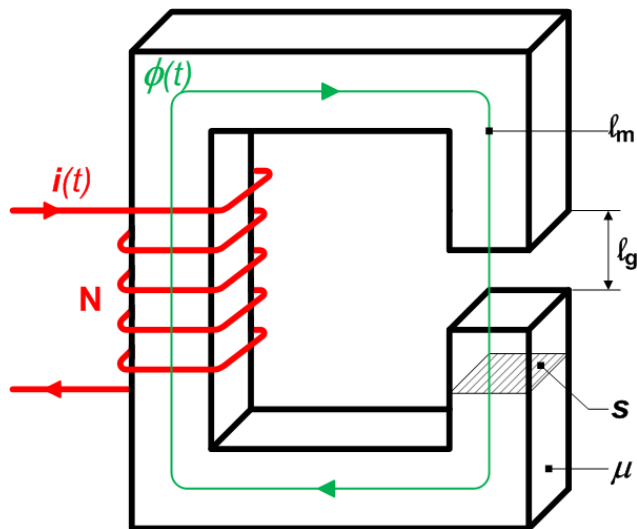
- CERÁMICO
- MICA
- PAPEL
- POLIPROPILENO (MKP)
- POLIESTIRENO (MKS)
- POLIESTER (MKT)
- $AlO_3$



COMPONENTES MAGNÉTICOS: REVISIÓN DE CONCEPTOS

- Inducción magnética:  $\vec{B}[T]$
- Excitación magnética:  $\vec{H}[\frac{A}{m}]$
- Flujo magnético:  $\phi [Wb]$
- Permeabilidad magnética:  $\mu [\frac{H}{m}]$ 
  - En el vacío:  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [\frac{H}{m}]$
  - En un material soft:  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_R$

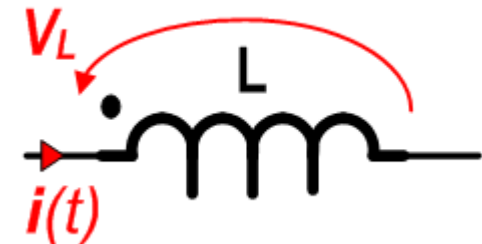
- $\vec{B}[T] = \mu \cdot \vec{H}$
- $\phi [Wb] = \vec{B} \cdot \vec{s}$
- Ley de Ampère:  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum N \cdot I$
- Ley de Faraday:  $v(t) = -N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$
- Ley de Hopkinson:  $N \cdot I = \phi \cdot \sum \mathcal{R}$
- Maxwell (2):  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$



$$\mathcal{R}_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_R \cdot s}$$

$$\mathcal{R}_g \cong \frac{l_g}{\mu_0 \cdot s}$$

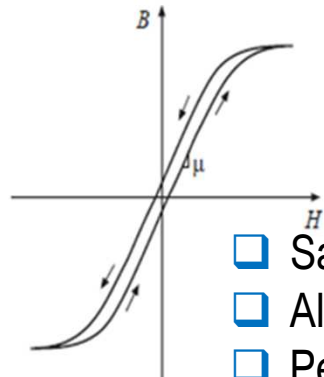
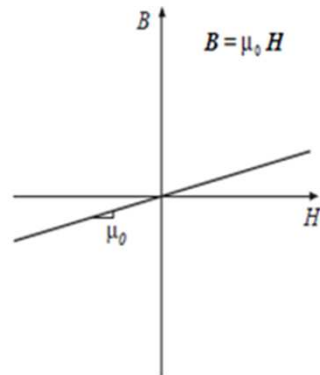
$$P = A_L = \frac{1}{\mathcal{R}_l + \mathcal{R}_g}$$



$$v_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m + \mathcal{R}_g} \cong \frac{N^2}{\frac{l_m}{\mu_0 \mu_R \cdot s} + \frac{l_g}{\mu_0 \cdot s}}$$

## COMPONENTES MAGNÉTICOS: REVISIÓN DE CONCEPTOS



### PROPIEDADES DEL NÚCLEO

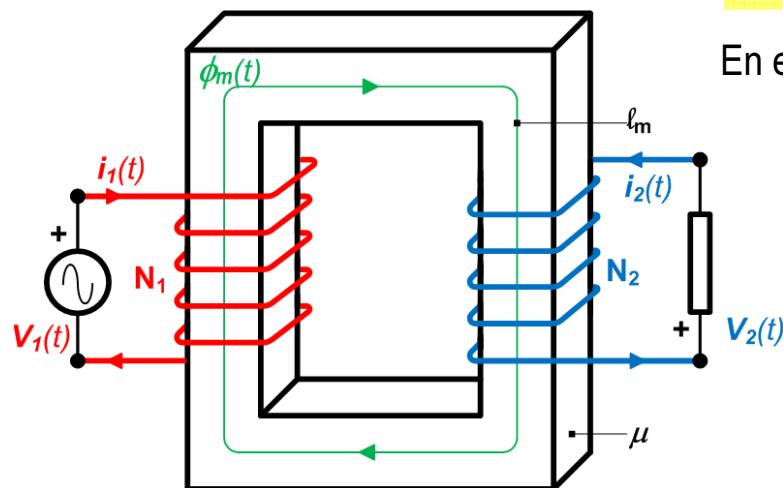
- ☐ Saturación
- ☐ Alinealidad tipo histéresis
- ☐ Permeabilidad función de H
- ☐ Pérdidas por corrientes Foucault
- ☐ Pérdidas por histéresis

### MATERIAL DEL NÚCLEO:

- ☐ Acero-silicio
- ☐ Acero-silicio grano orientado
- ☐ Ferrites
- ☐ Hierro pulverizado
- ☐ Materiales amorfos



## TRANSFORMADOR



$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \phi_m \cdot \mathcal{R}$$

En el caso ideal:  $\mu \rightarrow \infty \Rightarrow \mathcal{R} \rightarrow 0$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

Caso ideal significa que no existe flujo disperso !



Por ley de Faraday:

$$\frac{d\phi_m}{dt} = \frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

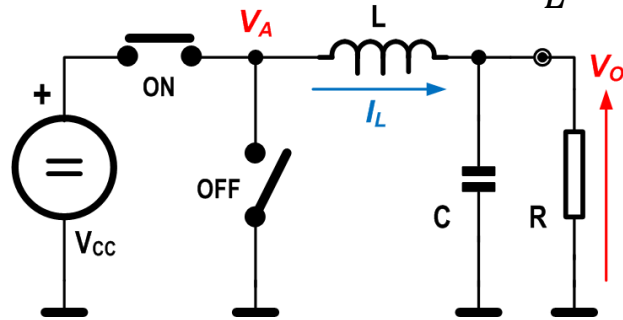
## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### CASO 1: BUCK O FORWARD

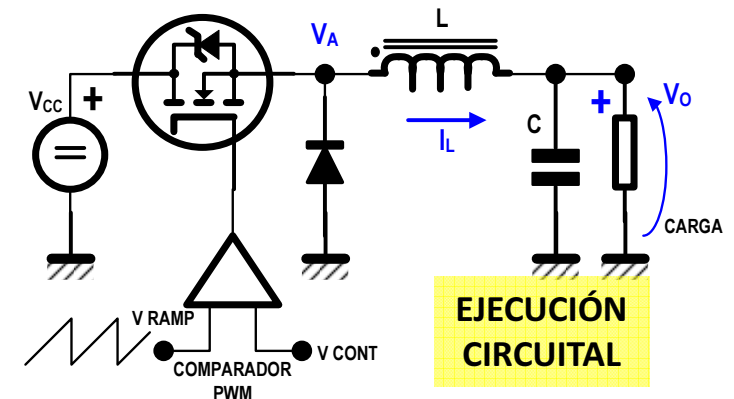
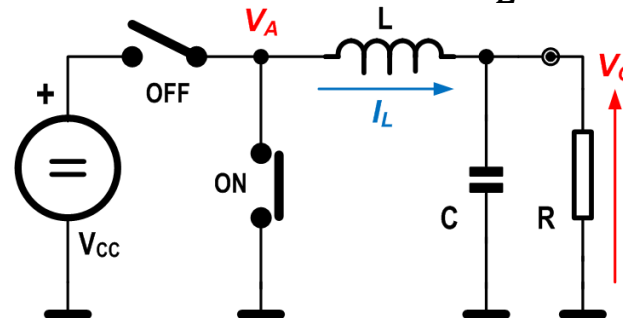
- HIPÓTESIS CCM:  $I_L > 0$
- PERÍODO CONSTANTE:  $T_S$
- REDUCIDO RIPPLE:  $\Delta V_o \ll V_o$

**CICLO DE TRABAJO:**  
 $0 \leq D(t) \triangleq \frac{T_{ON}(t)}{T_S} \leq 1$

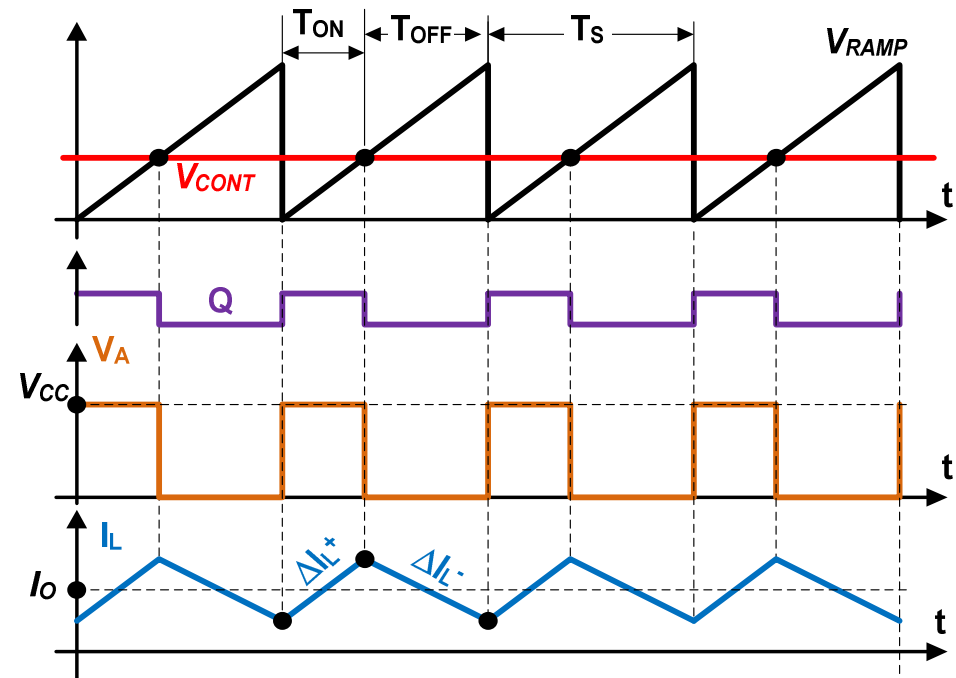
**ESTADO ON:**  $\Delta I_L^+ = \frac{(V_{CC} - V_o)}{L} \cdot T_{ON}$



**ESTADO OFF:**  $\Delta I_L^- = \frac{(V_o)}{L} \cdot T_{OFF}$



**EJECUCIÓN CIRCUITAL**



**ESTADO ESTACIONARIO:**

$$\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$$

**RELACIÓN DE CONVERSIÓN:**

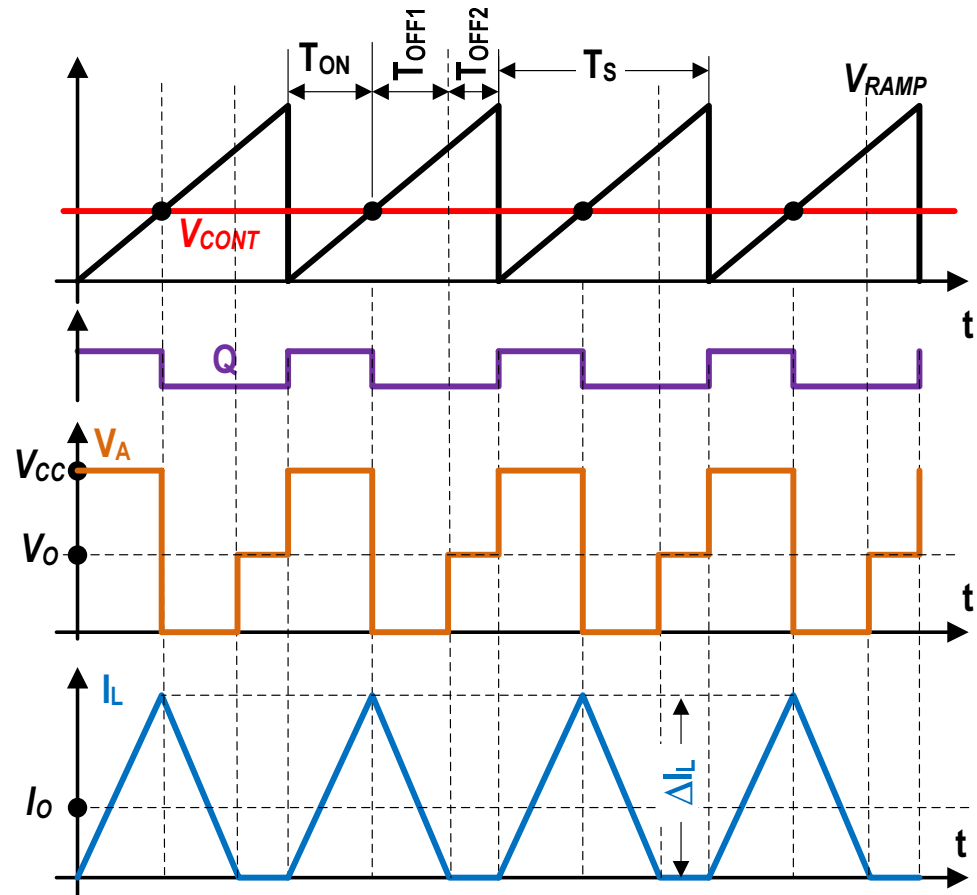
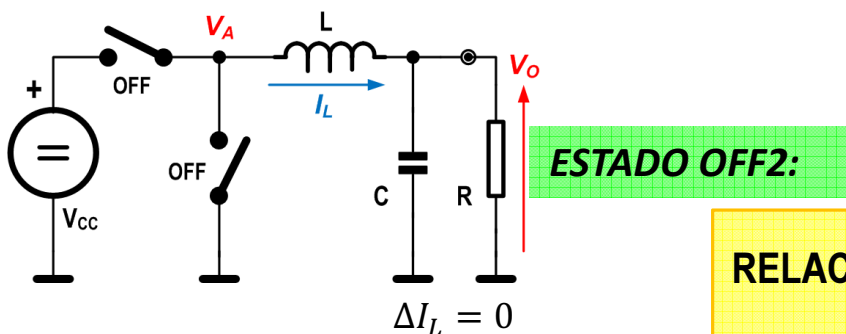
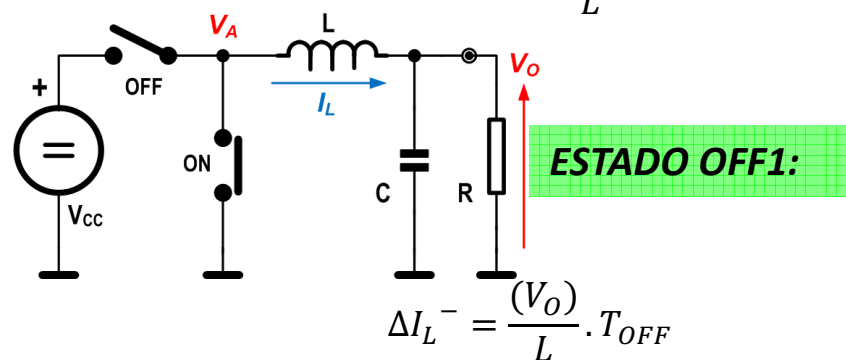
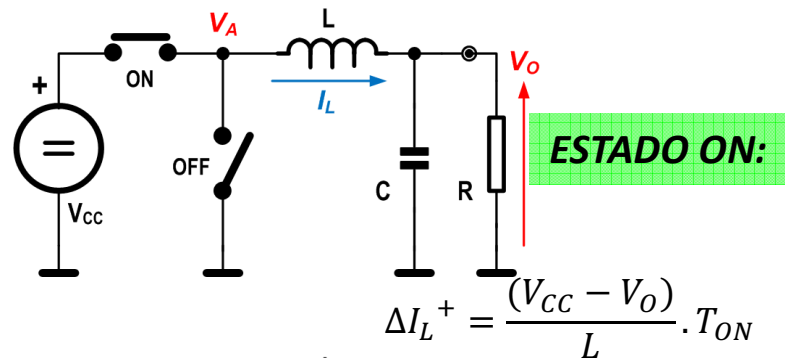
$$V_o = D(t) \cdot V_{CC}$$

PROPORCIONALIDAD => LINEALIDAD ?

## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

CCM=Continuous Conduction Mode  
DCM=Discontinuous Conduction Mode

### CASO 1: BUCK O FORWARD (LÍMITE CCM / DCM)

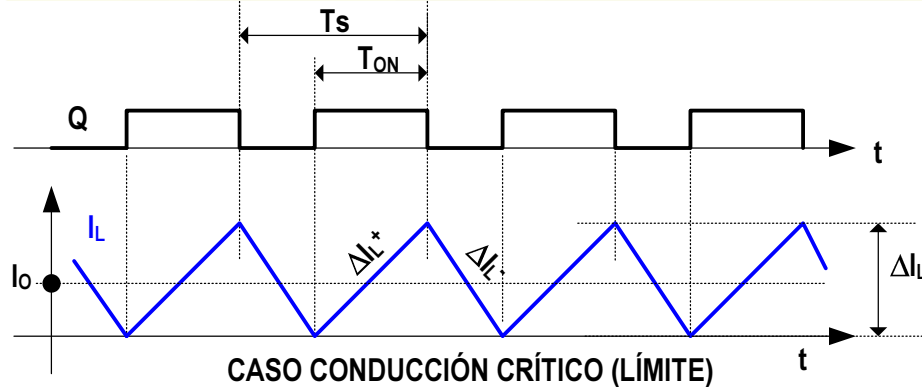


RELACIÓN DE CONVERSIÓN: 
$$V_O = \frac{D \cdot V_{CC}}{D + \frac{2 \cdot L \cdot I_O}{D \cdot V_{CC} \cdot T_s}} = f\{D, I_O\}$$

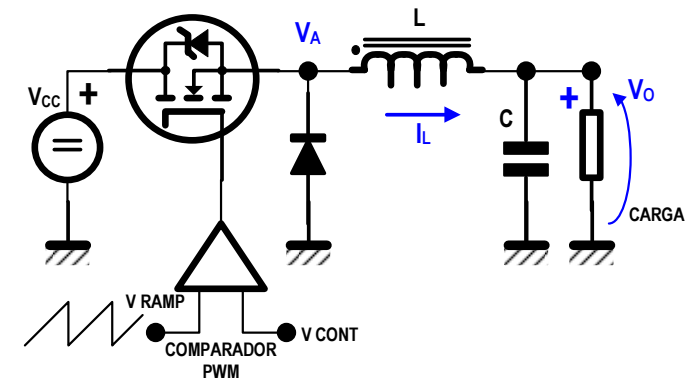
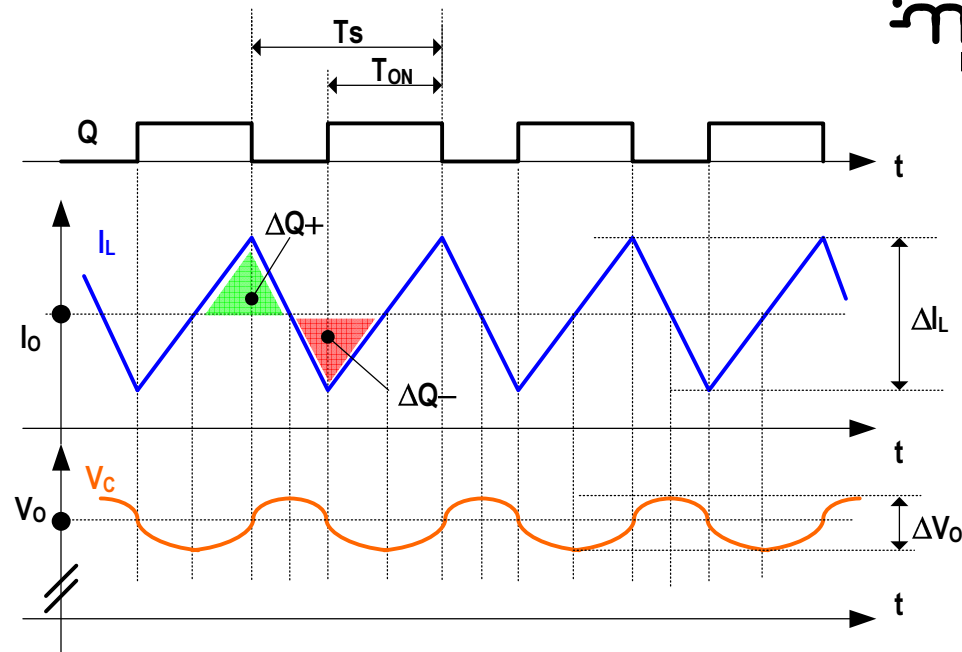


## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### CASO 1: BUCK O FORWARD (CÁLCULO DE ELEMENTOS)



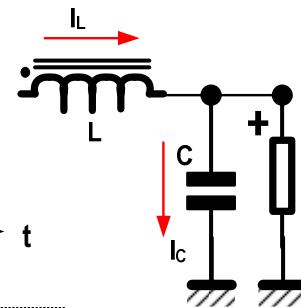
#### CÁLCULO DE RIPPLE DE TENSÓN EN CCM:



INDUCTOR CRÍTICO

$$\Delta I_L = 2 \cdot I_O \rightarrow$$

$$L_C = \frac{V_O(1 - D_{min}) \cdot T_S}{2 \cdot I_{Omin}}$$

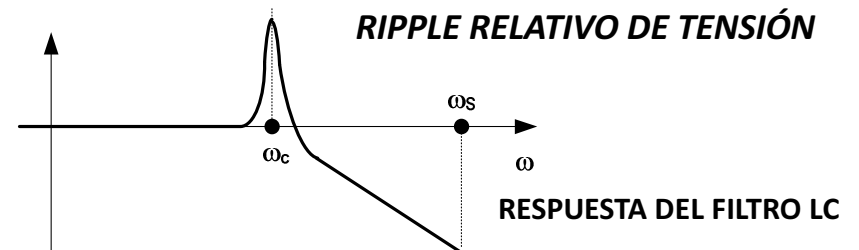


$$\Delta V_O = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{T_S}{2} \cdot \frac{1}{2C} = \frac{V_O(1 - D) \cdot T_S^2}{8 \cdot L \cdot C}$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{(1 - D)}{8 \cdot L \cdot C \cdot F_S^2} \rightarrow$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = (1 - D) \cdot \frac{1}{2} \pi^2 \left( \frac{\omega_c}{\omega_s} \right)^2$$

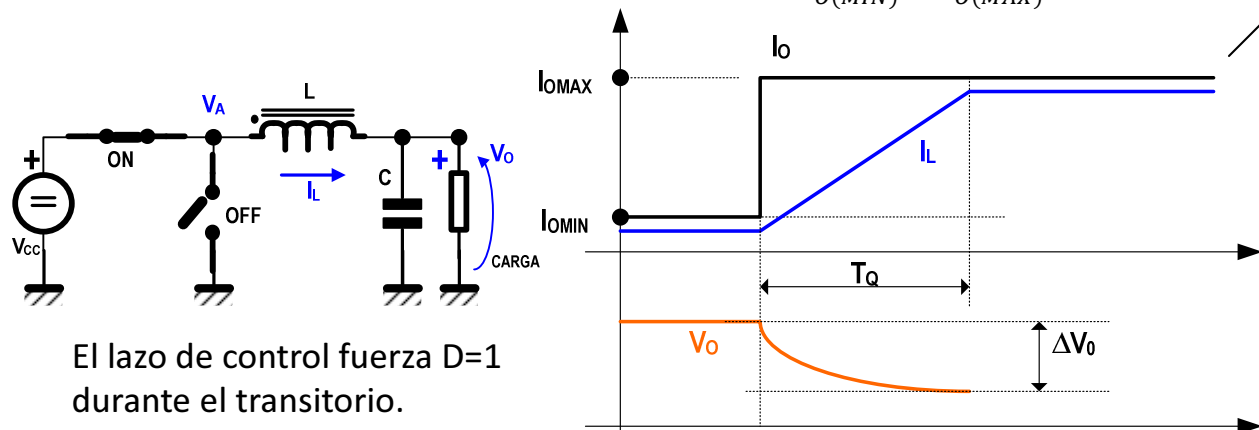
RIPPLE RELATIVO DE TENSÓN



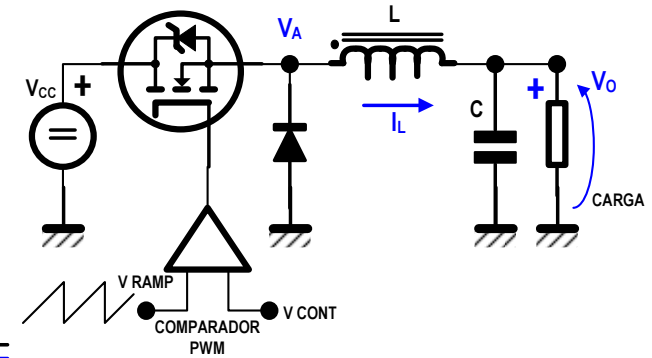
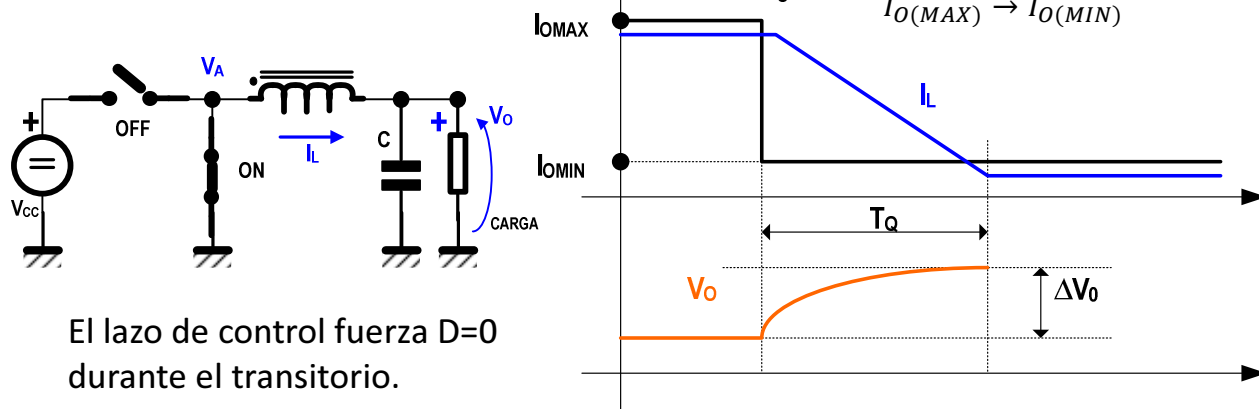
## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### CASO 1: BUCK O FORWARD (RESPUESTA TRANSITORIA)

#### ESCALÓN DE CARGA POSITIVO



#### ESCALÓN DE CARGA NEGATIVO



$$T_Q \approx L \cdot \frac{(I_{LMAX} - I_{LMIN})}{(V_{CC} - V_O)}$$

$$\Delta V_O \approx L \cdot \frac{(I_{LMAX} - I_{LMIN})^2}{2 \cdot C \cdot (V_{CC} - V_O)}$$

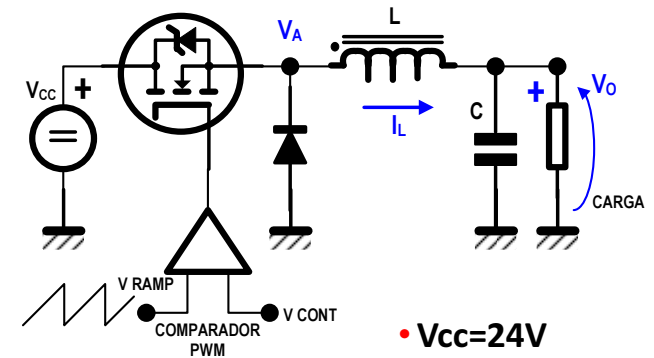
$$T_Q \approx L \cdot \frac{(I_{LMAX} - I_{LMIN})}{V_O}$$

$$\Delta V_O \approx L \cdot \frac{(I_{LMAX} - I_{LMIN})^2}{2 \cdot C \cdot V_O}$$

\* Se asume pequeña perturbación

## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

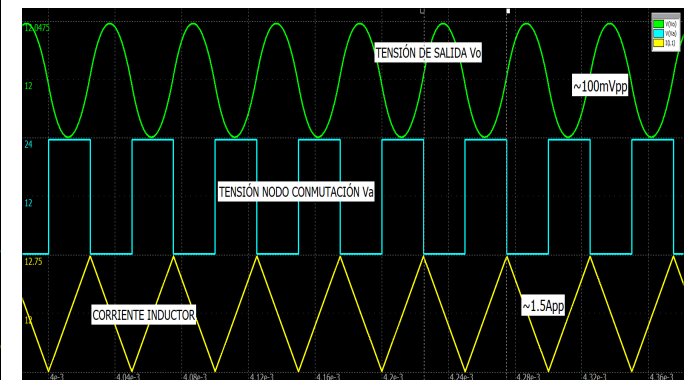
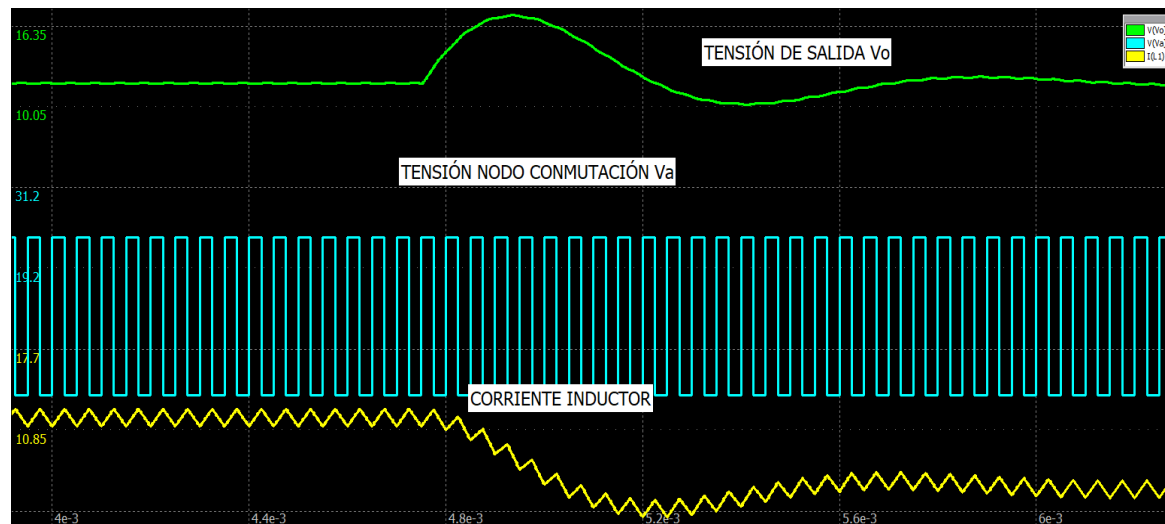
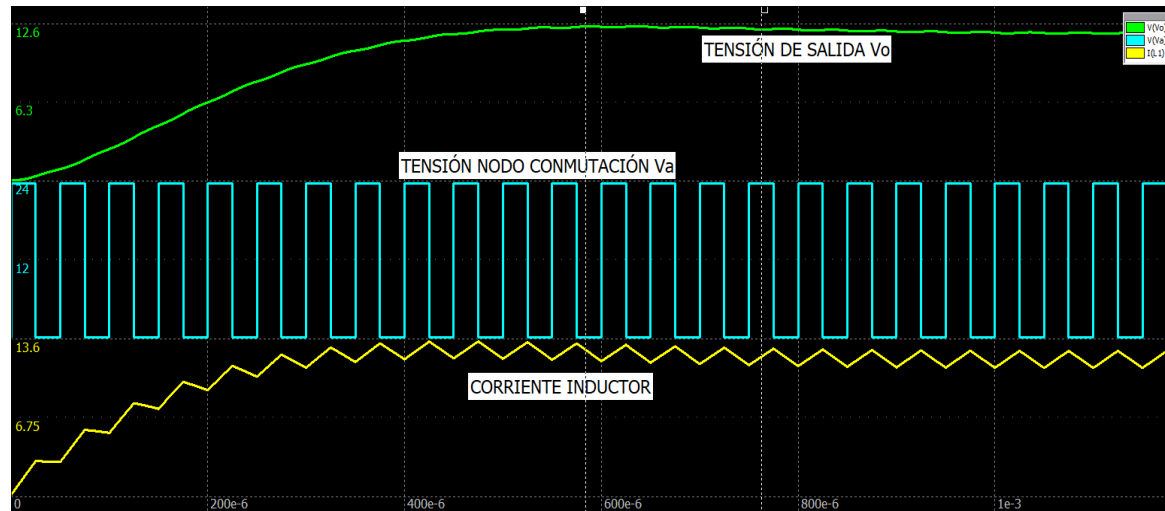
### CASO 1: BUCK O FORWARD



- $V_{cc}=24V$
- $F_{sw}=20kHz$
- $R=1\Omega$
- $D=0.5$
- $L=200\mu H$
- $C=100\mu F$

START-UP CON D Y R FIJOS

ESCALÓN DE CARGA 50% ↓



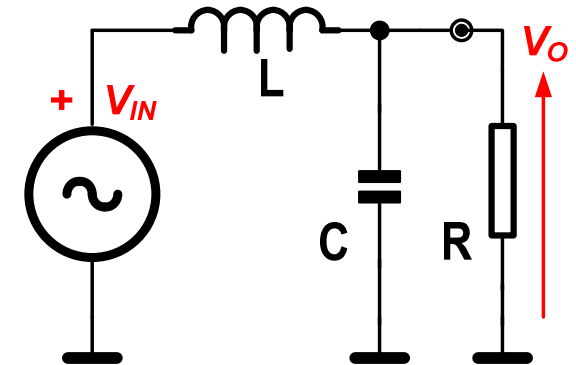
## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### RESPUESTA ELEMENTAL DEL FILTRO LC (MODO FORWARD)

FUNCIÓN TRANSFERENCIA: 
$$G_F(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \frac{L}{R} + s^2 \cdot LC}$$

Representando el denominador:

...y la transferencia resultante  $G_F$ :

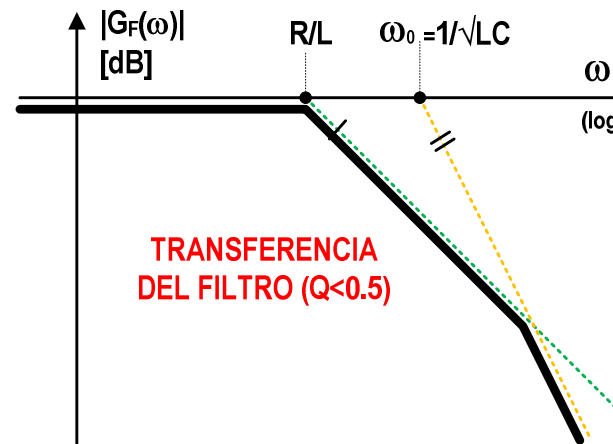
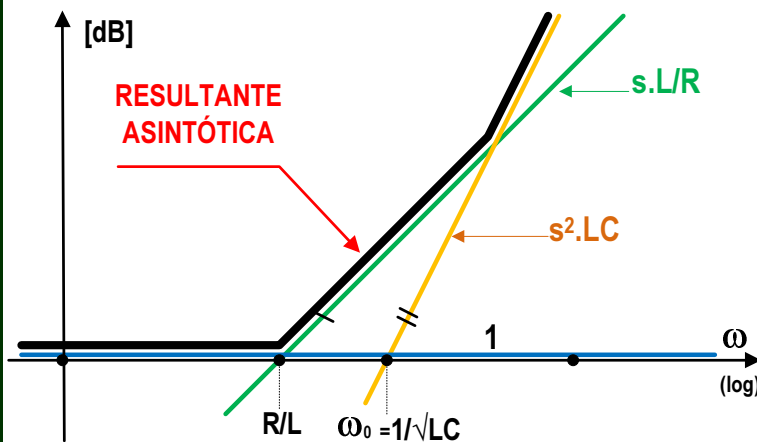


NOTACIÓN:

$$\omega_0 \triangleq \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$Z_0 \triangleq \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Q_0 \triangleq \frac{R}{Z_0} = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$



Hallando las raíces de la transferencia del filtro:

$$s_{1,2} = \frac{-1}{2 \cdot R \cdot C} \cdot \left( 1 \mp \sqrt{1 - 4 \cdot Q_0^2} \right)$$

$$Q_0 = \frac{R/L}{\omega_0} < \frac{1}{2}$$

**POLOS REALES!**



## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### RESPUESTA ELEMENTAL DEL FILTRO LC (MODO FORWARD)

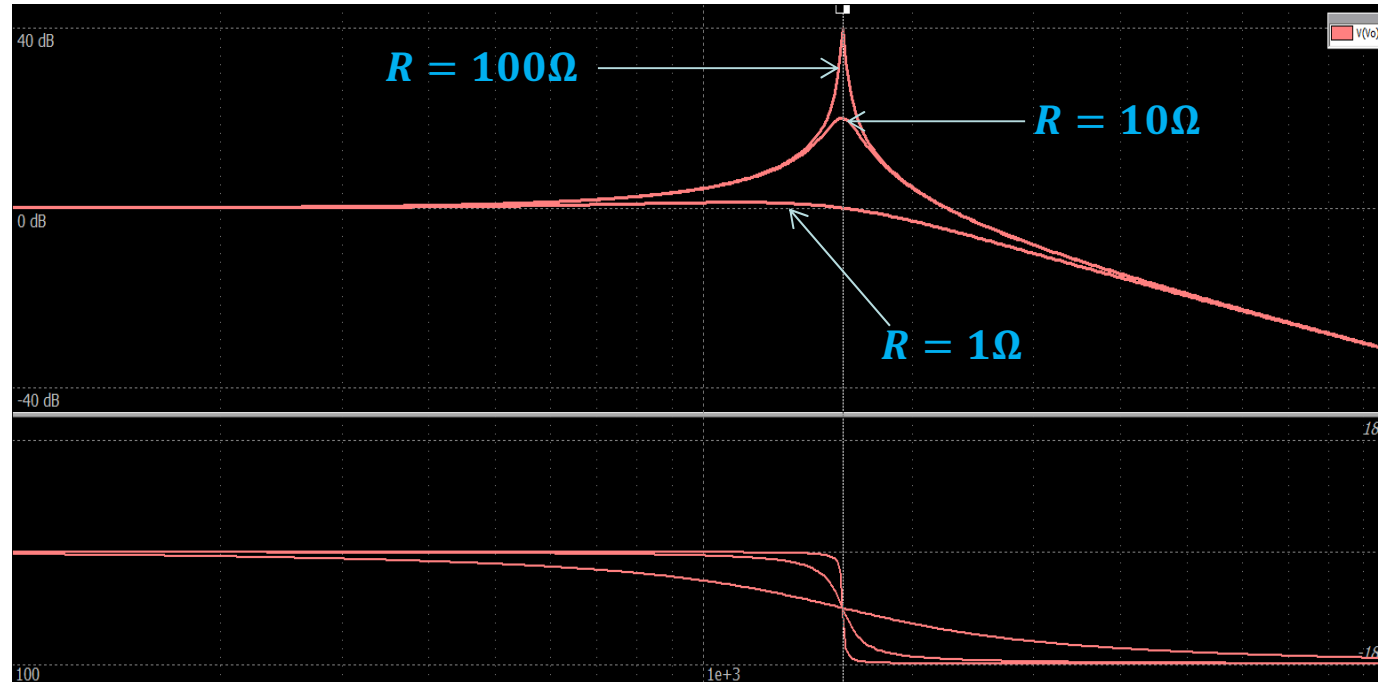
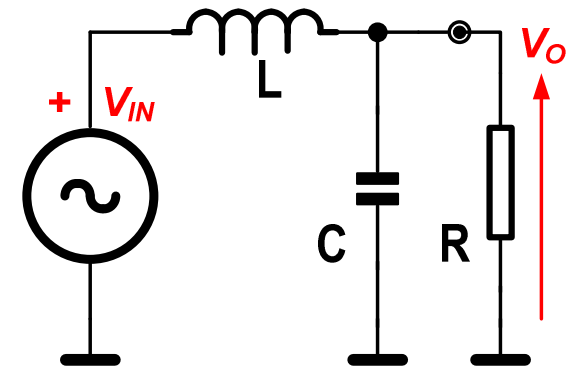
FUNCIÓN TRANSFERENCIA: 
$$G_F(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \frac{L}{R} + s^2 \cdot LC}$$

Derivando el denominador se obtiene el máximo  $\omega_{pk}$ :

$$\omega_{pk} = \omega_0 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot Q_0} \right)$$

$$Q_0 < \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$|G_F|$  MONÓTONAMENTE DECRECIENTE!



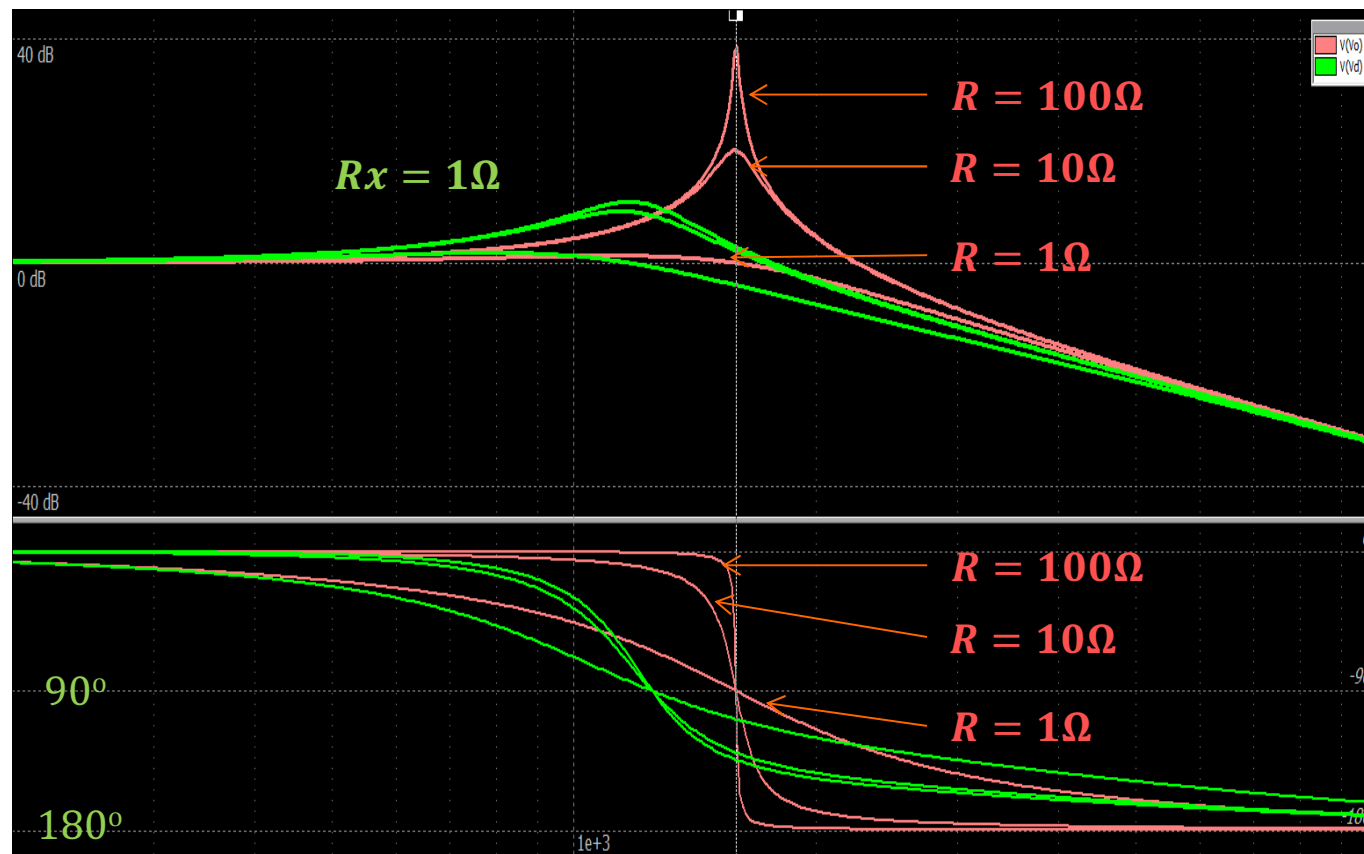
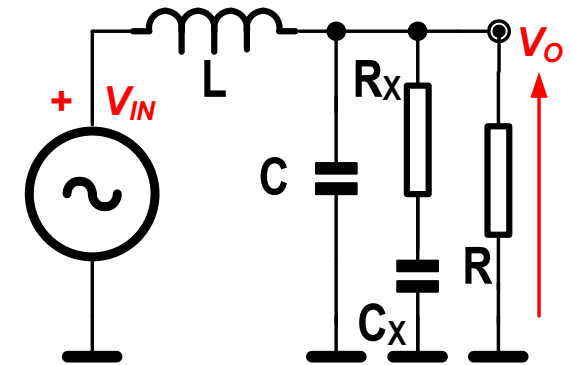
EJEMPLO:

$L=100\mu\text{H}$  ;  $C=100\mu\text{F}$

$\omega_0 = 10^4 \left[ \frac{r}{s} \right]$  ;  $Z_0 = 1\Omega$

## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### AMORTIGUAMIENTO DEL FILTRO LC (MODO FORWARD)



#### EJEMPLO:

$L=100\mu\text{H}$  ;  $C=100\mu\text{F}$

$R_X=1\Omega$  ;  $C_X=100\mu\text{F}$

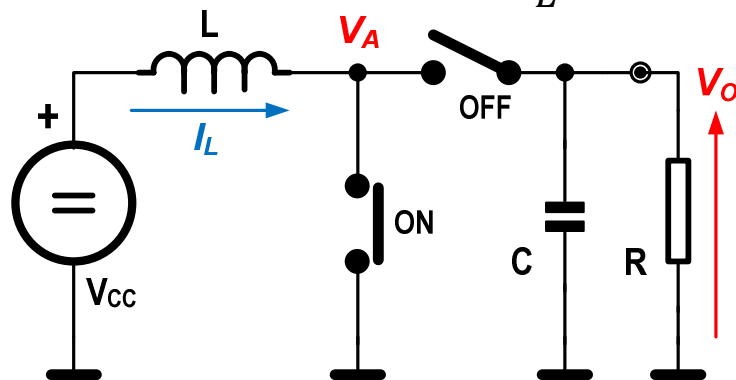
$\omega_0 = 10^4 \left[ \frac{r}{s} \right]$  ;  $Z_0 = 1\Omega$

## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### CASO 2: BOOST (CCM)

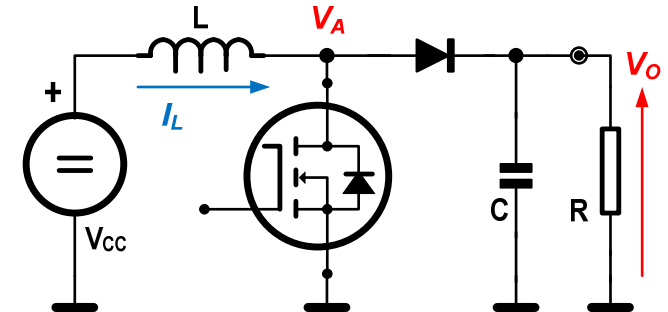
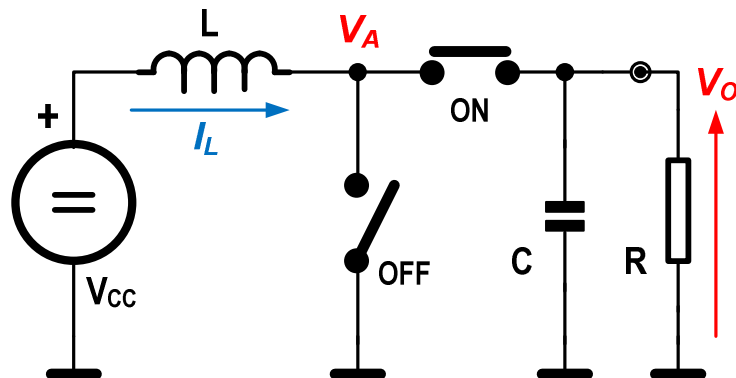
**ESTADO ON:**

$$\Delta I_L^+ = \frac{(V_{CC})}{L} \cdot T_{ON}$$

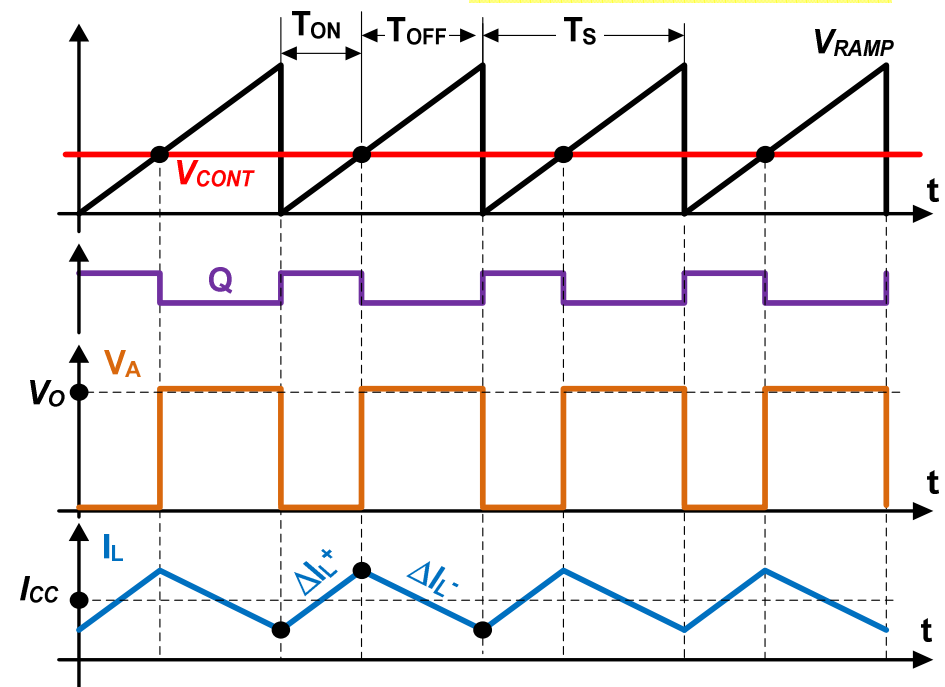


**ESTADO OFF:**

$$\Delta I_L^- = \frac{(V_O - V_{CC})}{L} \cdot T_{OFF}$$



**EJECUCIÓN CIRCUITAL**



**ESTADO ESTACIONARIO:**

$$\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$$

**RELACIÓN DE CONVERSIÓN:**

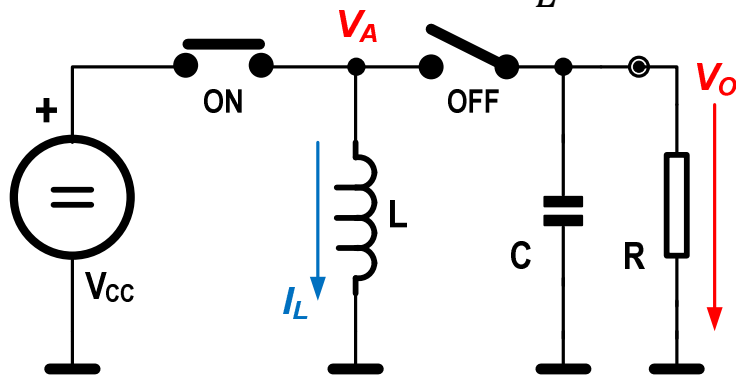
$$V_O = \frac{V_{CC}}{(1-D(t))}$$

## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO:

### CASO 2: FLYBACK (CCM)

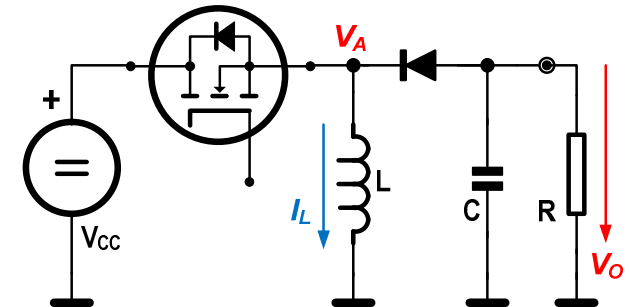
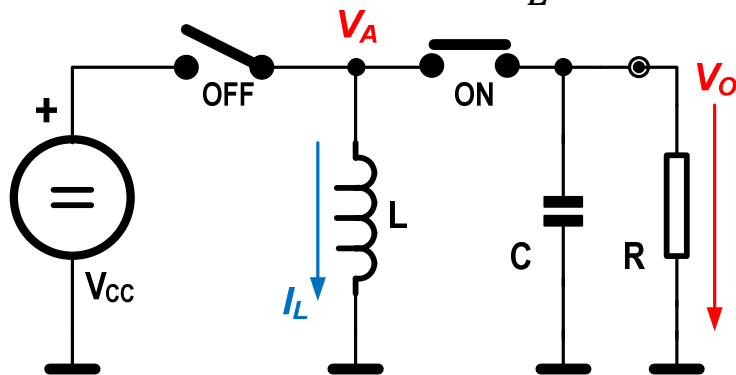
**ESTADO ON:**

$$\Delta I_L^+ = \frac{(V_{CC})}{L} \cdot T_{ON}$$

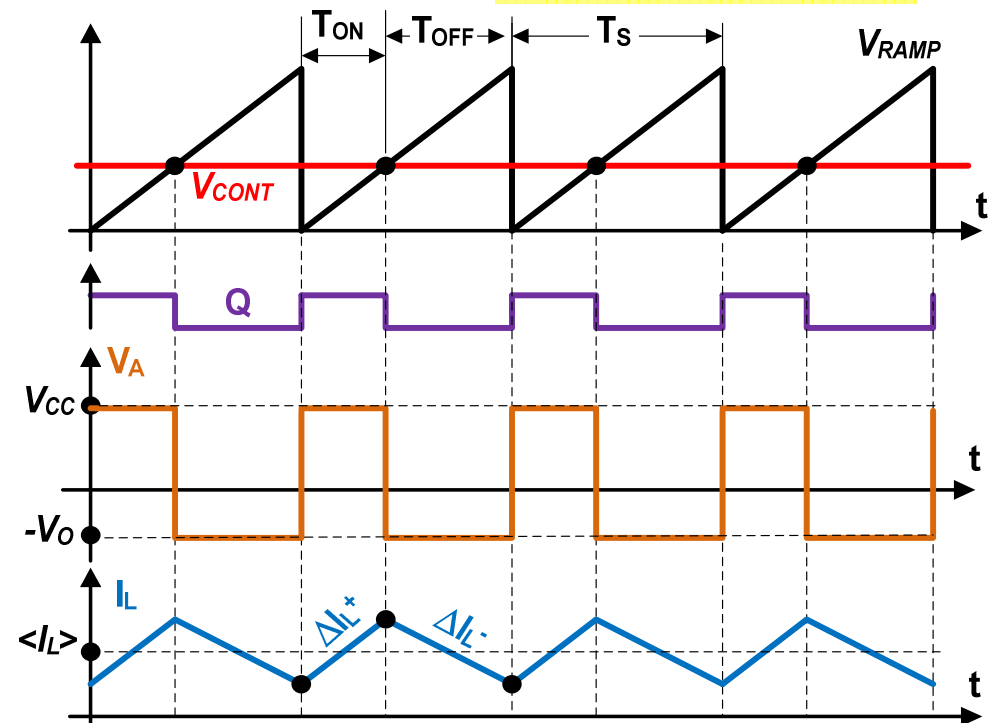


**ESTADO OFF:**

$$\Delta I_L^- = \frac{(V_O)}{L} \cdot T_{OFF}$$



**EJECUCIÓN CIRCUITAL**



**ESTADO ESTACIONARIO:**  
 $\Delta I_L^+ = \Delta I_L^-$

**RELACIÓN DE CONVERSIÓN:**

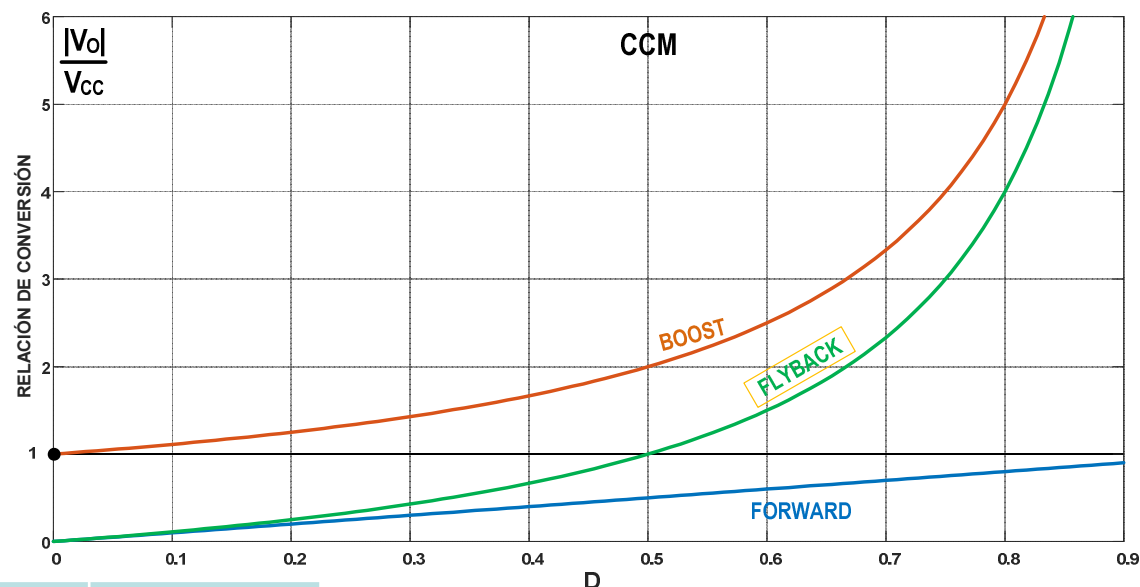
$$V_O = \frac{V_{CC} \cdot D(t)}{(1 - D(t))}$$



## CONVERTIDORES DC/DC EN ESTADO ESTACIONARIO: COMPARACIÓN

**CASO IDEAL (SIN PÉRDIDAS):**

$$P_{IN} = V_{CC} \cdot \overline{I_{CC}} = V_O \cdot I_O = P_O$$



	BUCK	BOOST	FLYBACK
Relación Conversión	D	1/(1-D)	D/(1-D)
Corriente media de entrada	$I_O \cdot D$	$I_O / (1-D)$	$I_O \cdot D / (1-D)$
Tipo de corriente de entrada	Pulsada	Continúa c/ripple	Pulsada
Tipo de corriente de salida	Continúa c/ripple	Pulsada	Pulsada
Tensión máxima llave activa	Vcc	V <sub>O</sub>	Vcc+ V <sub>O</sub>

Para evaluar durante el estudio:

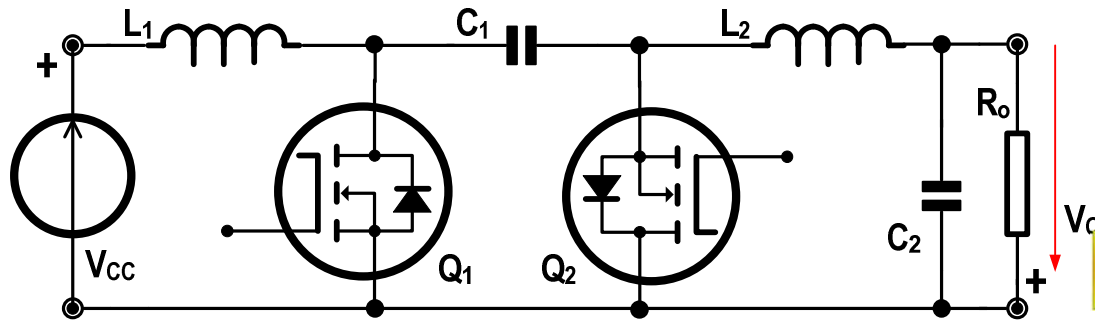
- ☐ Relación de conversión en DCM
- ☐ Inductor crítico p/boost, flyback
- ☐ Ripple casos boost y flyback
- ☐ Fenómeno escalón de carga
- ☐ Corriente media, RMS y pico en L
- ☐ Stress en las llaves
- ☐ Efecto de la ESR capacitor de filtro

## TOPOLOGÍAS DE MAYOR ORDEN

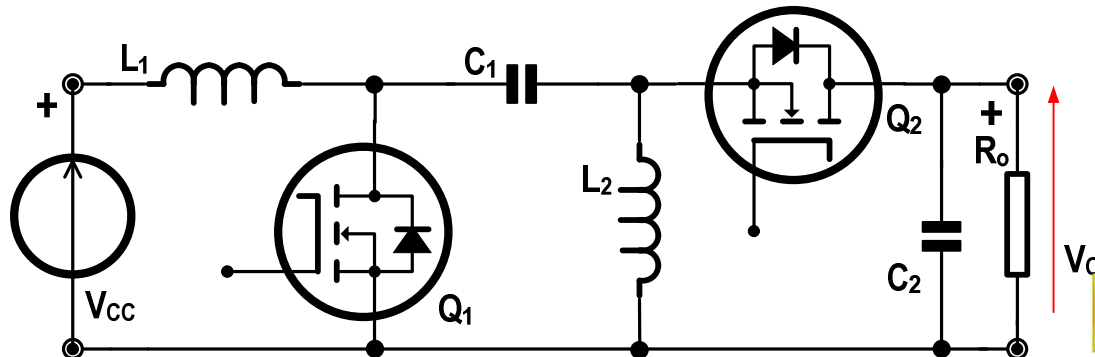
Estructuras de conversión DC/DC de “cuarto orden”, sincrónicas.

**RELACIÓN DE CONVERSIÓN:**

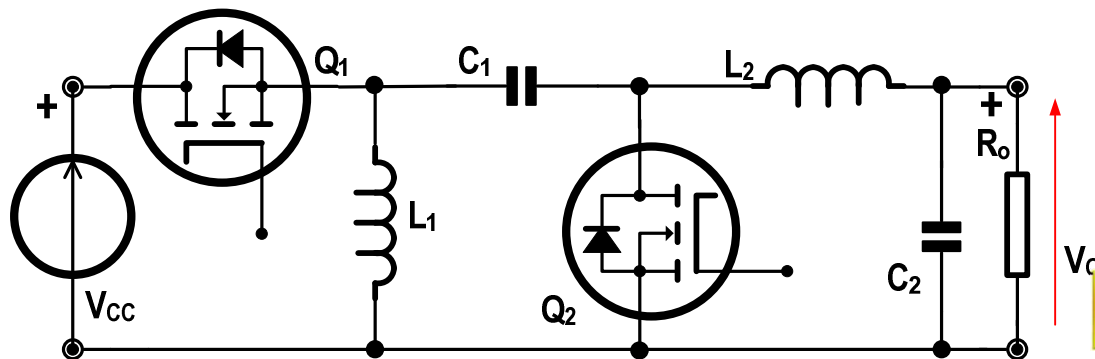
$$V_O = V_{CC} \cdot \frac{D}{(1-D)}$$



**CONVERTIDOR CÚK**

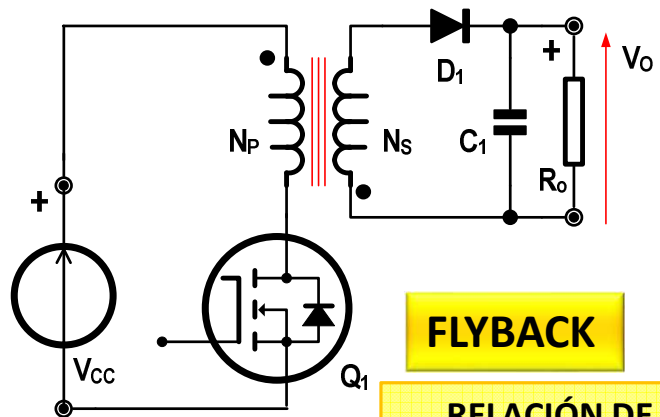


**CONVERTIDOR SEPIC**



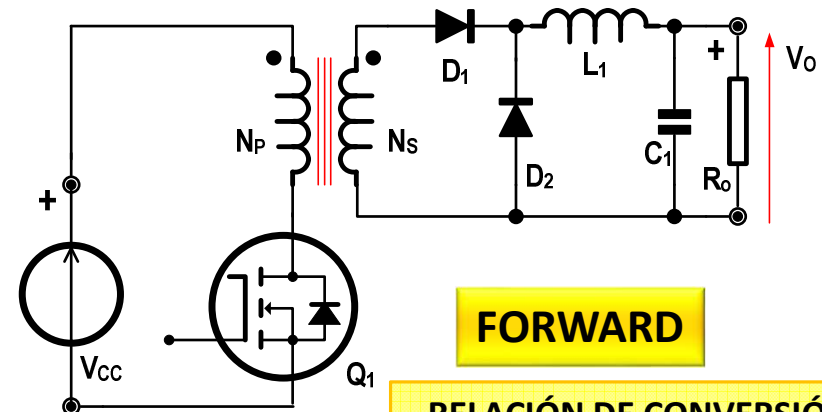
**CONVERTIDOR ZETA**

## TOPOLOGÍAS CON AISLACIÓN



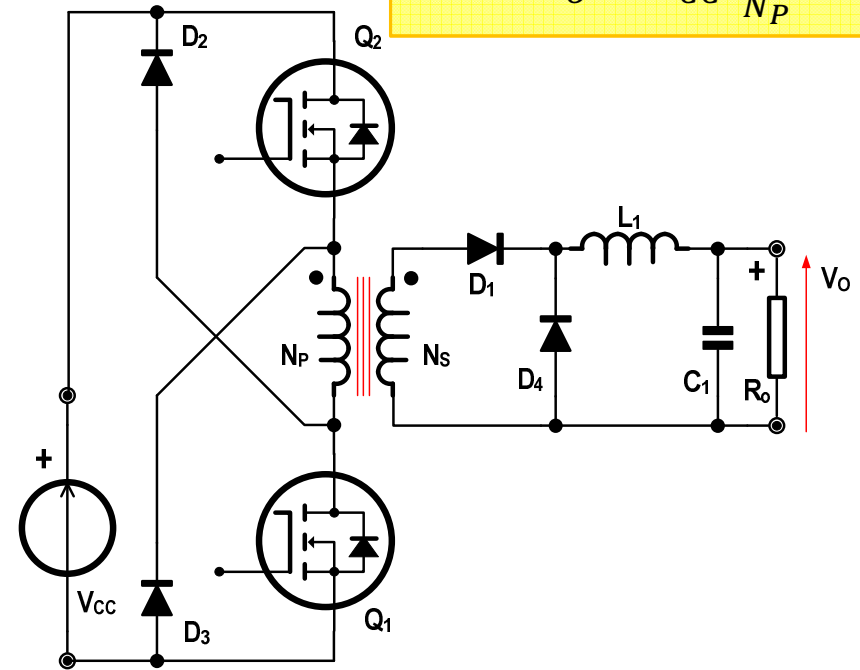
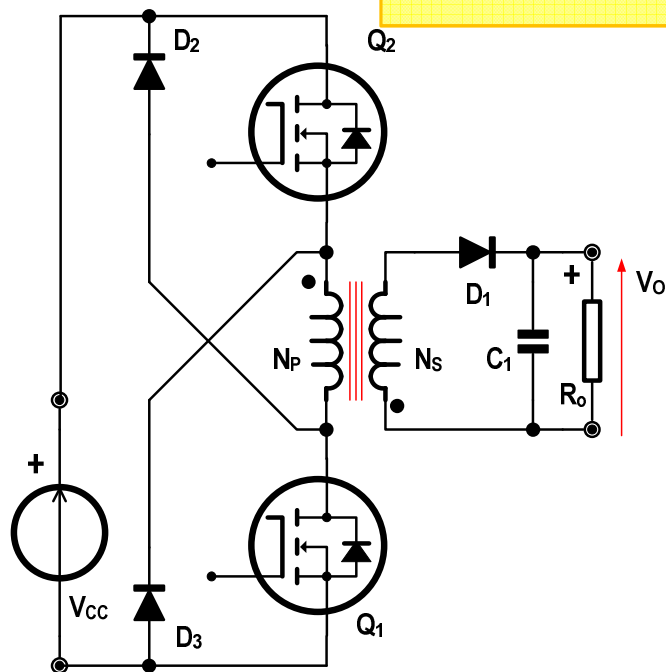
**FLYBACK**

RELACIÓN DE CONVERSIÓN  
(CCM):  $V_O = V_{CC} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot \frac{D}{(1-D)}$

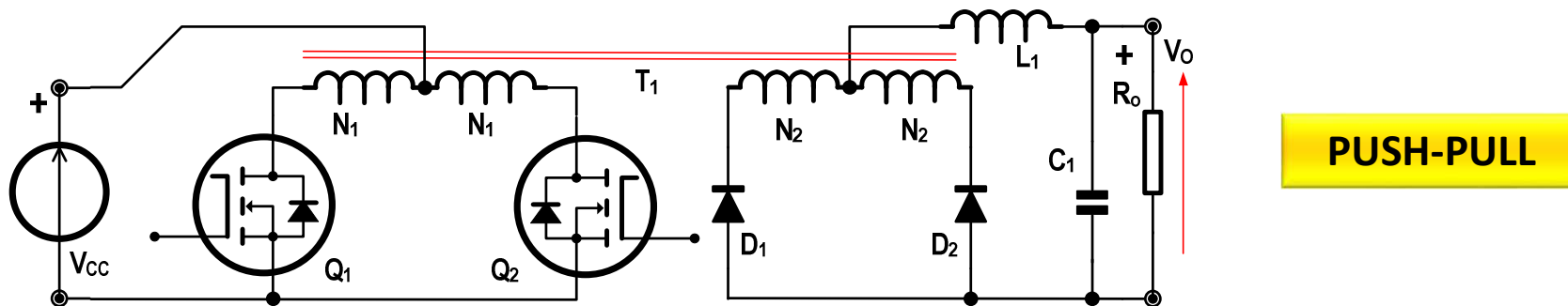
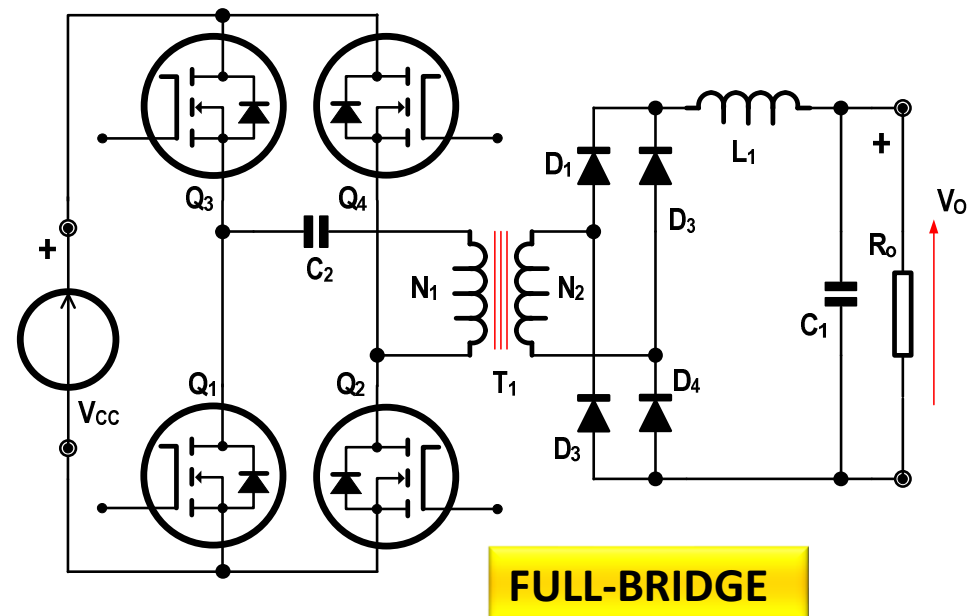
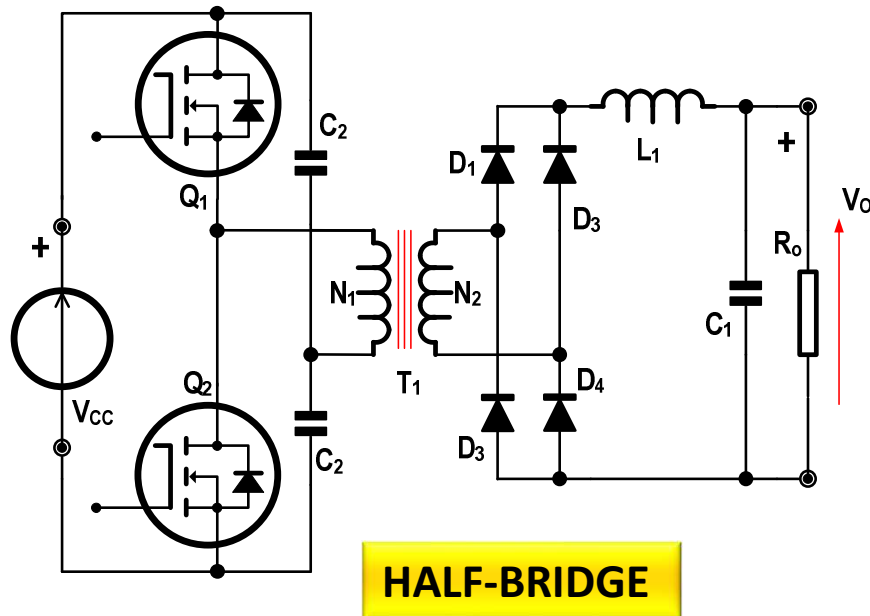


**FORWARD**

RELACIÓN DE CONVERSIÓN  
(CCM):  $V_O = V_{CC} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot D$



## TOPOLOGÍAS FORWARD CON AISLACIÓN



### SUMARIO:

- ☐ Los convertidores conmutados DC/DC son sistemas de estructura variable orientados a la conversión eficiente de energía eléctrica
- ☐ La célula elemental de conmutación junto con las reglas de conexión de fuentes definen tres topologías elementales con diferente relación de conversión
- ☐ La frecuencia de conmutación del convertidor impacta en el volumen de los elementos reactivos, a mayor frecuencia, menor volumen

### BIBLIOGRAFÍA:

- ☐ "Fundamentals of Power Electronics", Robert Erickson – Dragan Maksimovic'
- ☐ Apuntes de Cátedra



**PREGUNTAS ?**