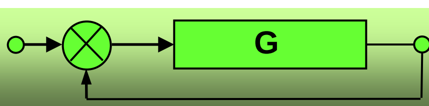
CONVERTIDORES DC - DC



CONVERTIDORES DC - DC

OBJETIVOS DEL MÓDULO:

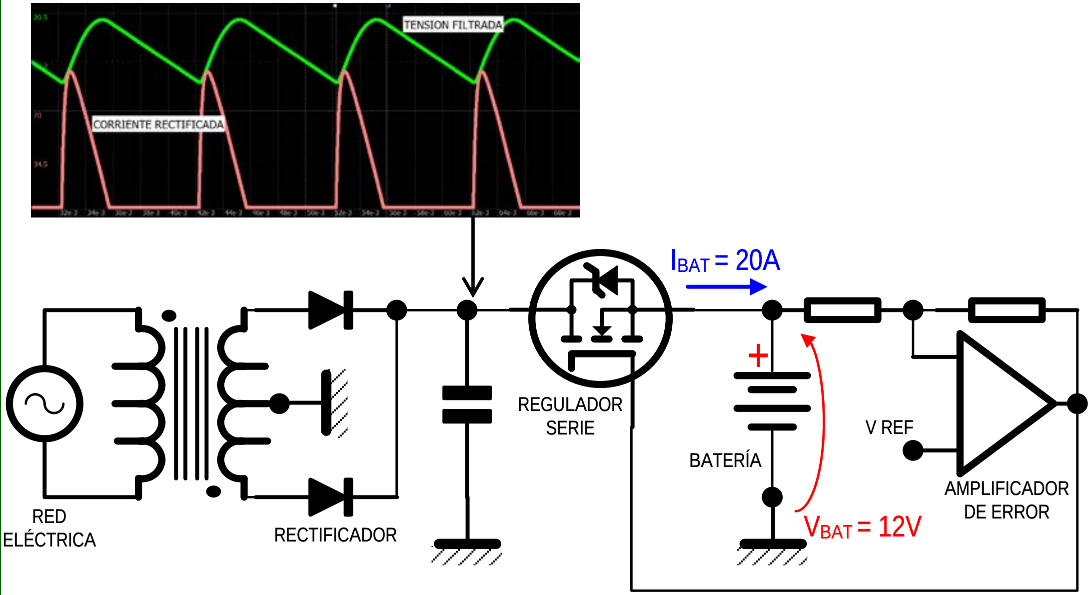
- INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE TÉCNICAS DE CONVERSIÓN ELECTRÓNICA DE POTENCIA
- ESTUDIO DE COMPONENTES PASIVOS Y ACTIVOS EN APLICACIONES DE POTENCIA
- ANÁLISIS Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS BÁSICAS DE CONVERSIÓN DC/DC
- MODELACIÓN Y CONTROL DE SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE (NO-L.T.I.)

ORGANIZACIÓN: (5 SESIONES)

- INTRODUCCIÓN: Paradigma del procesamiento de energía (eficiencia/densidad volumétrica energía/ costo/stress/controlabilidad/frecuencia conmutación)- Elementos circuitales- Estimación de pérdidas-
- TOPOLOGÍAS BÁSICAS: Forward / Flyback / Boost- Inclusión de transformador de aislación- Cálculo de elementos de filtro basados en prestaciones. Práctica demostrativa.
- MODELACIÓN DE SISTEMAS DE ESTRUCTURA VARIABLE: El método de promediación de estados.
- SIMULACIÓN CIRCUITAL: Verificación funcional de regímenes de operación. (LTSpice / NL5)
- PROYECTO: Diseño y compensación de convertidor DC-DC tipo forward. Discusión.

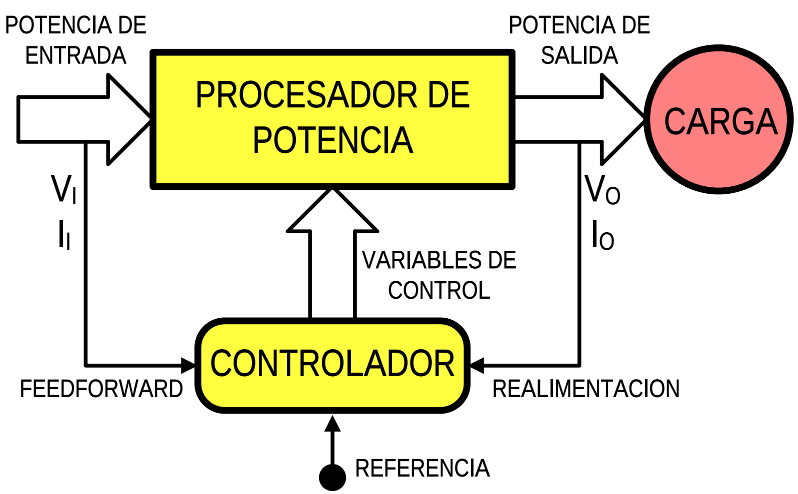
INTRODUCION

CASO LINEAL: REGULADOR DISIPATIVO + CONTROL:



- TENSION DE ENTRADA VARIABLE. REGULADOR?
- POTENCIA DE SALIDA= 240W – POTENCIA DE ENTRADA= ?
- EFICIENCIA ?
- FACTOR DE FORMA CORRIENTE DEL RECTIFICADOR?
- RED ELÉCTRICA?
- DIODOS
- INTERFERENCIA?
- DISTORSIÓN DE RED?
- FACTOR DE POTENCIA?
- DISIPADOR?
- COSTO?
- VOLUMEN?

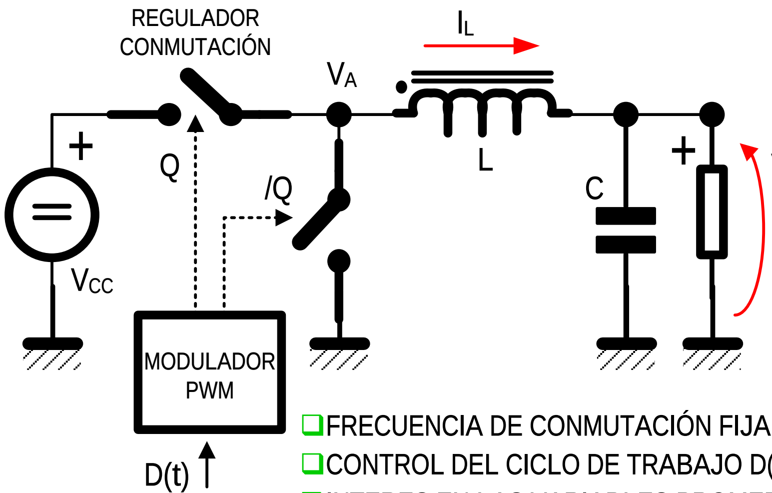
ENFOQUE GENERAL:

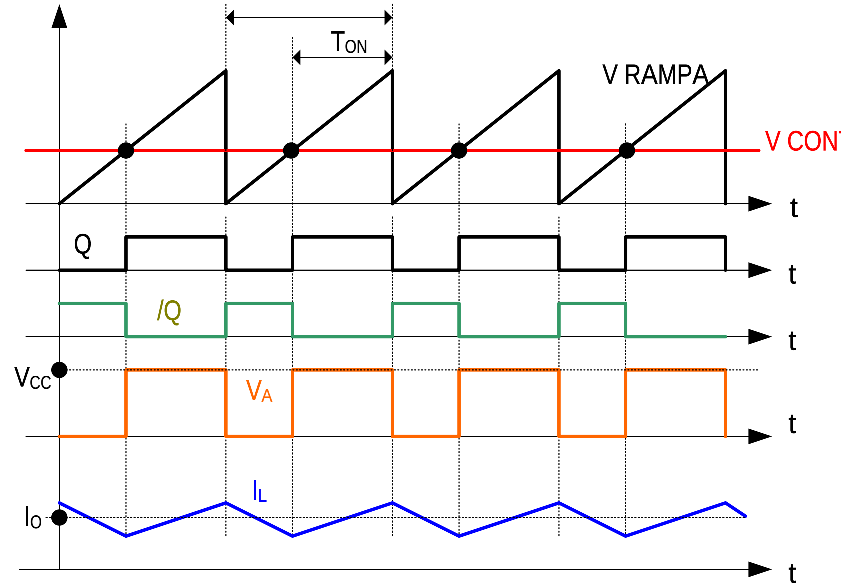


- FUENTE DE ENTRADA DC (CORRIENTE O TENSIÓN)
- CARGA DE SALIDA DC (CORRIENTE O TENSIÓN)
- EFICIENCIA: L, C, TRANSFORMADORES, SWITCHES !
- SISTEMA DE CONTROL ORIENTADO AL PROCESADOR DE POTENCIA
- VOLUMEN, COSTO, INTERFERENCIA, DINÁMICA?

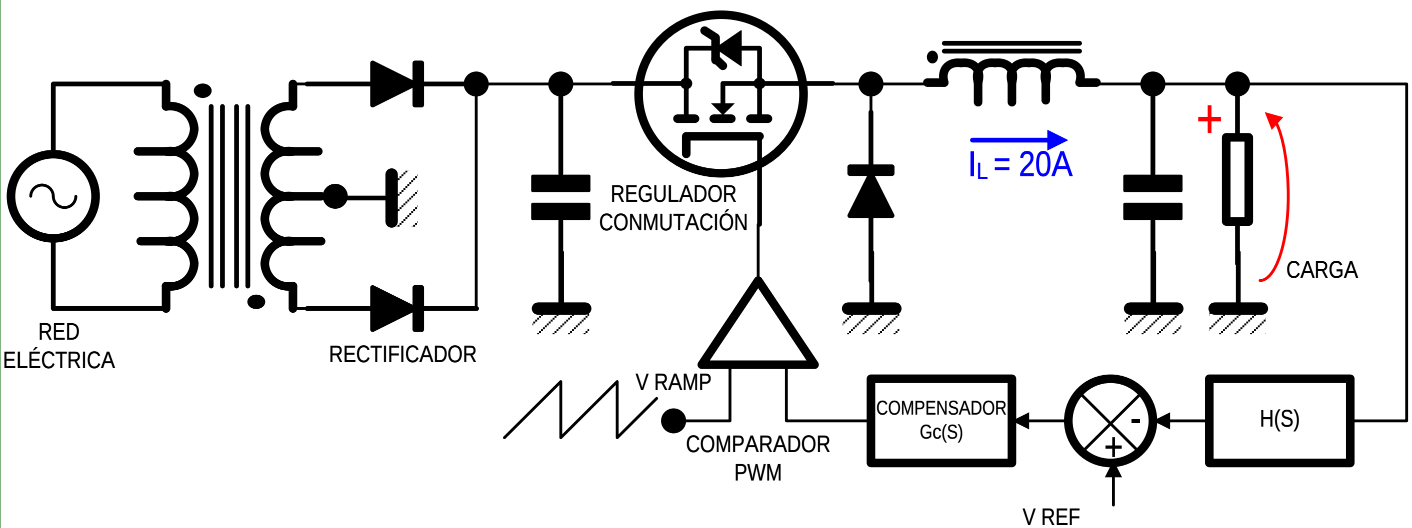
INTRODUCION

PROCESADOR NO LINEAL: REGULADOR CONMUTADO + CONTROL





- FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN FIJA Fs
- CONTROL DEL CICLO DE TRABAJO D(t), 0<D(t)<1
- INTERES EN LAS VARIABLES PROMEDIO SOBRE T=1/Fs
- SISTEMA CON ESTRUCTURA VARIABLE
- DOS ENTRADAS, NO APLICA LINEALIDAD



- HIPÓTESIS CCM: IL>0
- REDUCIDO RIPPLE

IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL PARCIAL

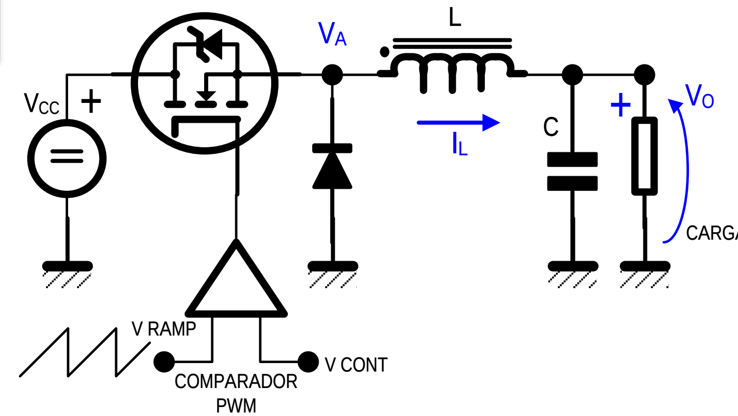
CONVERTIDORES DC-DC EN ESTADO ESTACIONARIO

CASO 1: FORWARD (BUCK)

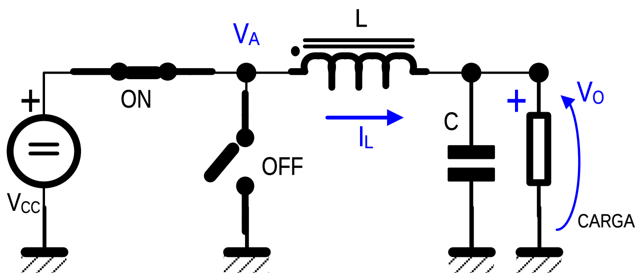
- HIPÓTESIS CCM: IL>0
- REDUCIDO RIPPLE: ΔVo<<Vo
- UN SWITCH ACTIVO (FORZADO)
- UN SWITCH PASIVO (NATURAL)

CICLO DE TRABAJO:

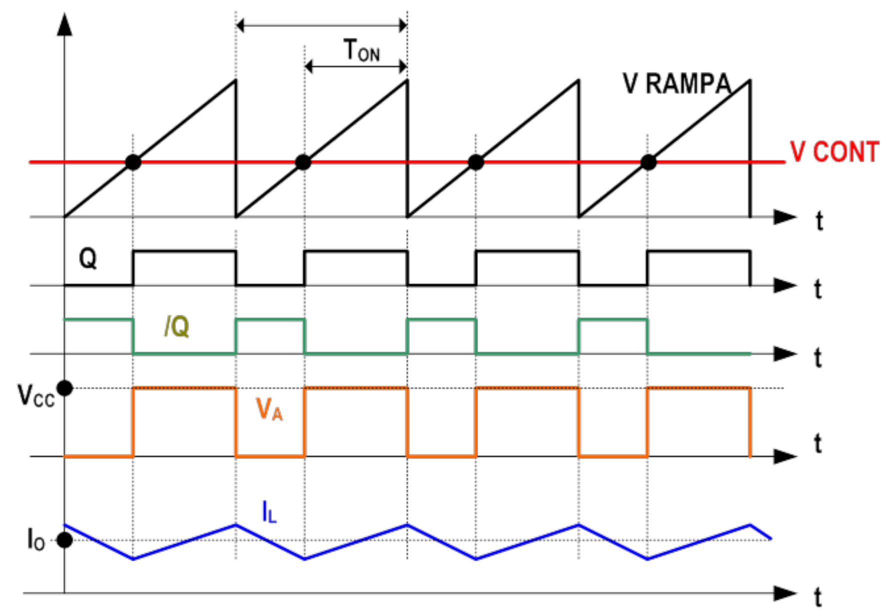
$$0 \leq D(t) = \frac{T_{ON}}{T_S} \leq 1$$



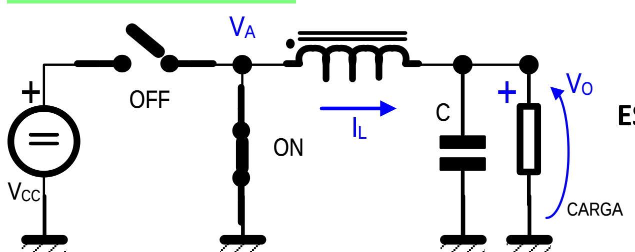
ESTADO ON:



$$L\frac{di_L}{dt} = (V_{CC} - V_O) \rightarrow \Delta I_L^+ = \frac{D.T_S}{L}.(V_{CC} - V_O) \quad (1)$$



ESTADO OFF:



$$-L\frac{di_L}{dt} = V_O \rightarrow \Delta I_L^- = \frac{(1-D).T_S}{L}.V_O \quad (2)$$

ESTADO ESTACIONARIO:

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

RELACIÓN DE CONVERSIÓN:

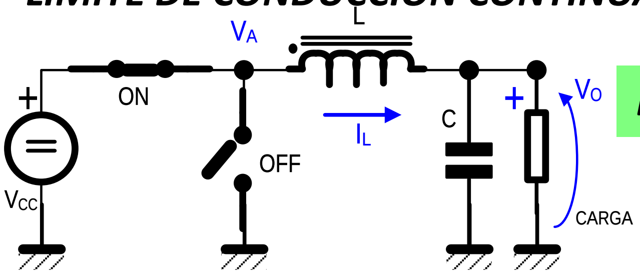
$$V_O = D.V_{CC}$$

PROPORCIONALIDAD=> LINEALIDAD ?

CONVERTIDORES DC-DC EN ESTADO ESTACIONARIO

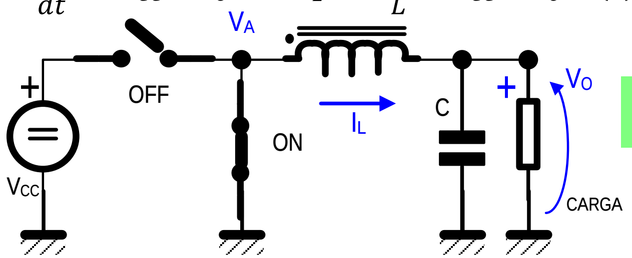
CASO 1: FORWARD (BUCK)

LÍMITE DE CONDUCCIÓN CONTÍNUA (CCM / DCM)



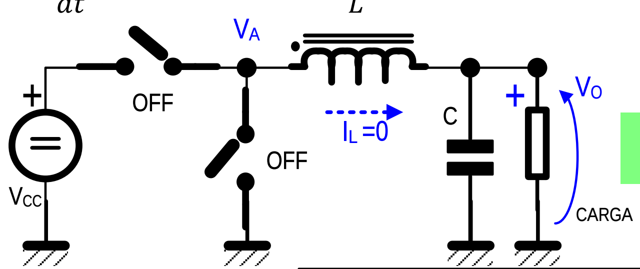
ESTADO ON:

$$L\frac{di_L}{dt} = (V_{CC}-V_O) \rightarrow \Delta I_L^{+} = \frac{D.T_S}{L}.(V_{CC}-V_O) \quad (1)$$



ESTADO OFF1:

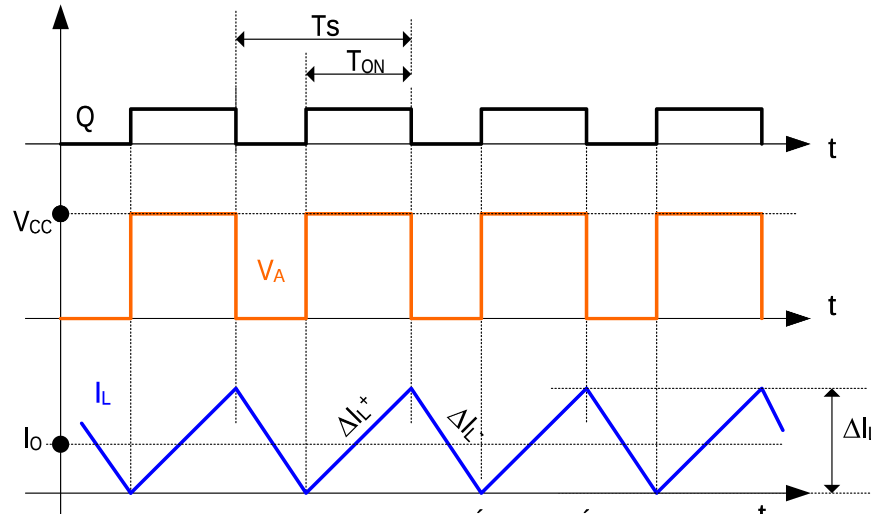
$$-L\frac{di_L}{dt} = V_O \rightarrow \Delta I_L^{-} = \frac{(1-D).T_S}{L}.V_O \quad (2)$$



ESTADO OFF2:

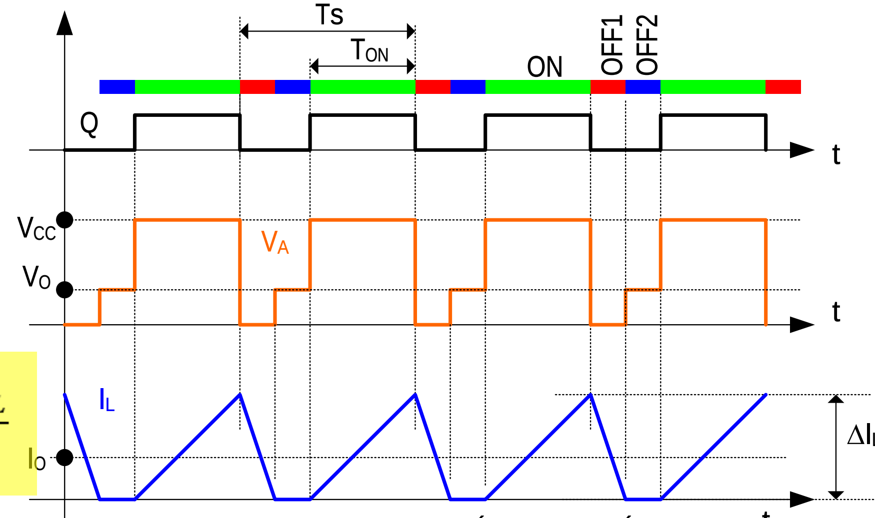
RELACIÓN DE CONVERSIÓN:

$$V_O = \frac{D.V_{CC}}{D+\frac{2.L.I_O}{D.V_{CC}.T_S}} = F\{D,I_O\}$$



CASO CONDUCCIÓN CONTÍNUA

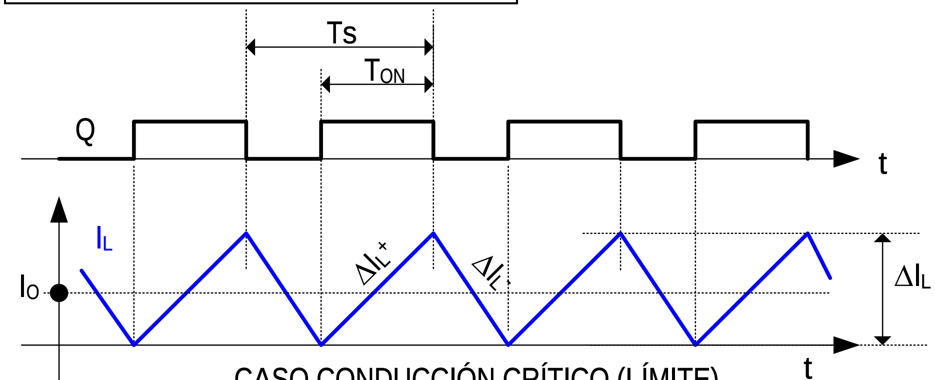
$$I_O < \frac{\Delta I_L}{2}$$



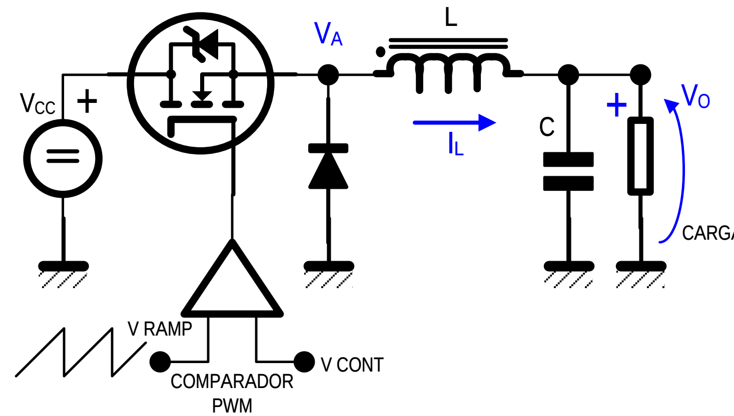
CASO CONDUCCIÓN DISCONTÍNUA

CONVERTIDORES DC-DC EN ESTADO ESTACIONARIO

CASO 1: FORWARD (BUCK)



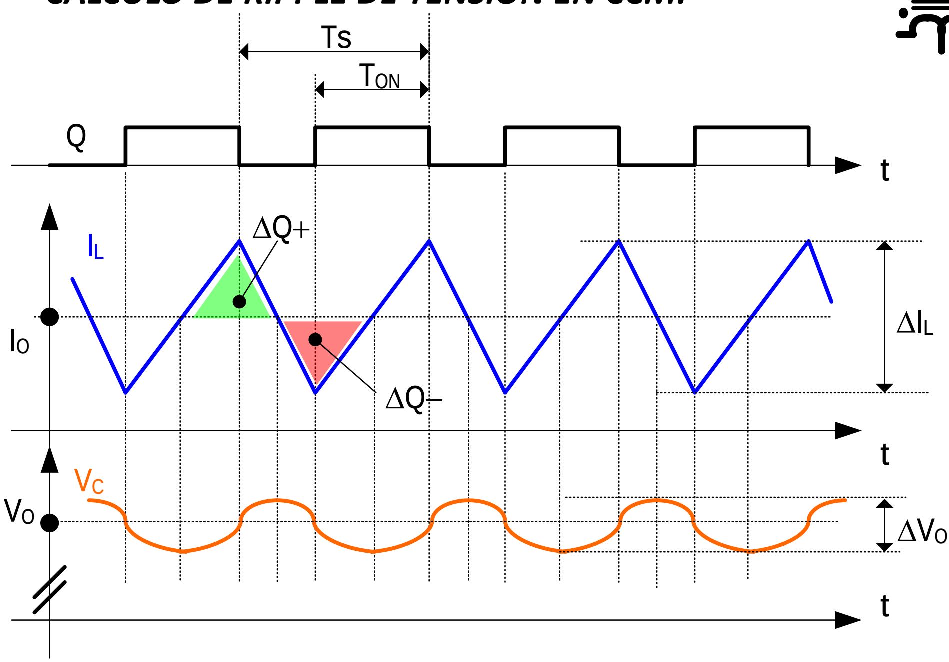
CASO CONDUCCIÓN CRÍTICO (LÍMITE)

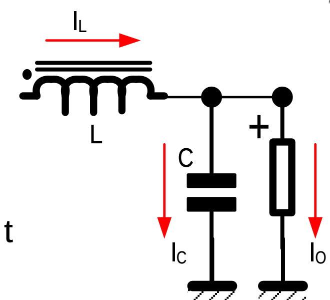


INDUCTOR CRÍTICO (MÍNIMO)

$$\Delta I_L = 2.I_O \rightarrow \boxed{L_C = \frac{V_O(1-D_{min}).T_S}{2.I_{Omin}}}$$

CÁLCULO DE RIPPLE DE TENSIÓN EN CCM:

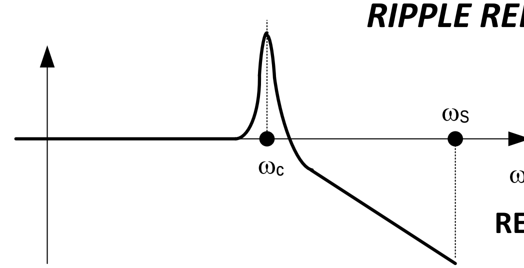




$$\Delta V_O = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\Delta I_L}{2}.\frac{T_S}{2}.\frac{1}{2C} = \frac{V_O(1-D).T_S^2}{8.L.C}$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{(1-D)}{8.L.C.F_S^2} \rightarrow \boxed{\frac{\Delta V_O}{V_O} = (1-D).\frac{1}{2}\pi^2\left(\frac{\omega_C}{\omega_S}\right)^2}$$

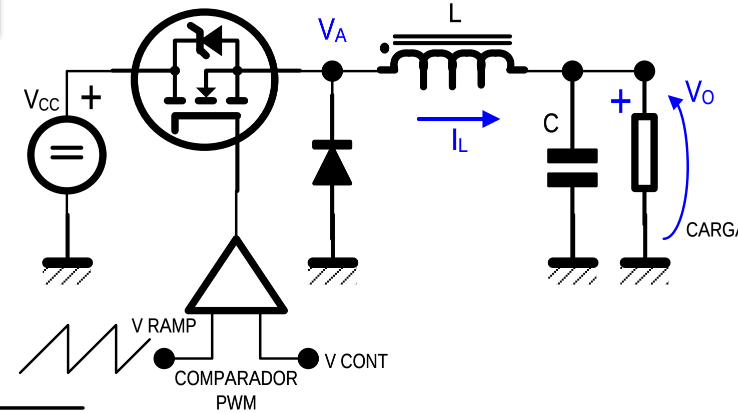
RIPPLE RELATIVO DE TENSIÓN



RESPUESTA DEL FILTRO LC

CONVERTIDORES DC-DC EN ESTADO TRANSITORIO

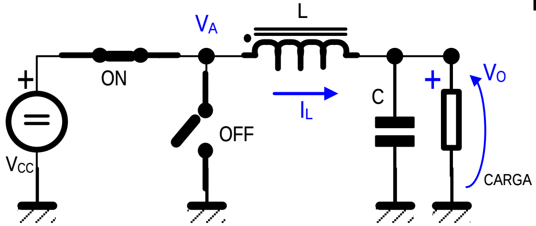
CASO 1: FORWARD (BUCK)

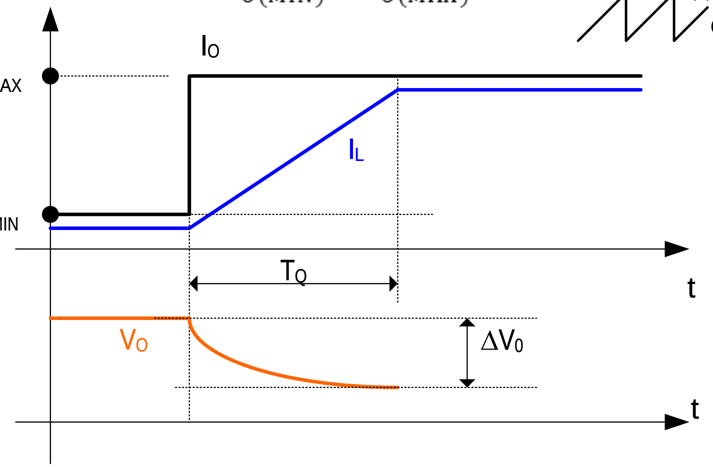


RESPUESTA TRANSITORIA EN LAZO ABIERTO A UN ESCALÓN DE CARGA

❑ ESCALÓN DE CARGA POSITIVO

$$I_{O(MIN)} \rightarrow I_{O(MAX)}$$





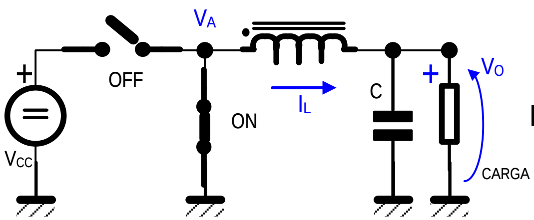
El lazo de control fuerza D=1 durante el transitorio.

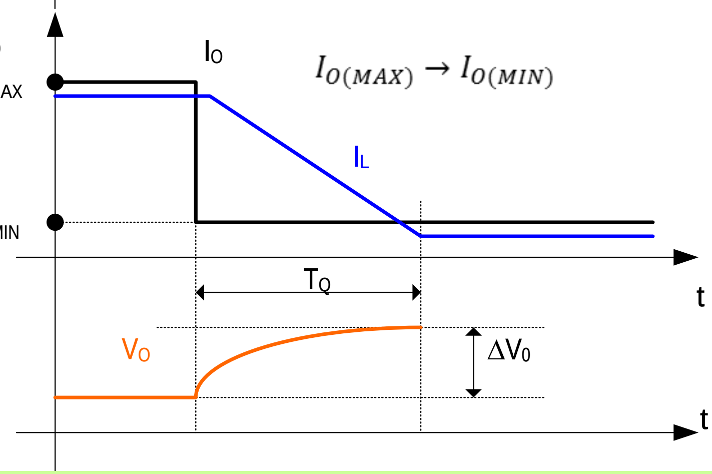
$$T_Q \approx L.\frac{(I_{LMAX} - I_{LMIN})}{(V_{CC} - V_O)}$$

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

❑ ESCALÓN DE CARGA NEGATIVO

$$I_{O(MAX)} \rightarrow I_{O(MIN)}$$





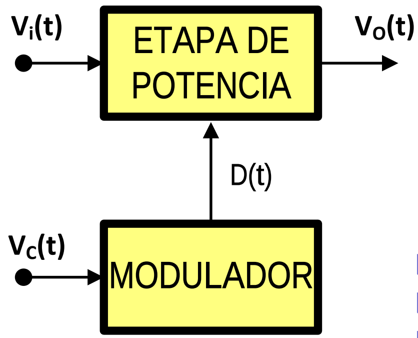
El lazo de control fuerza D=0 durante el transitorio.

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

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

* Se asume pequeña perturbación

MODELIZACIÓN POR PROMEDIACIÓN DE ESTADOS

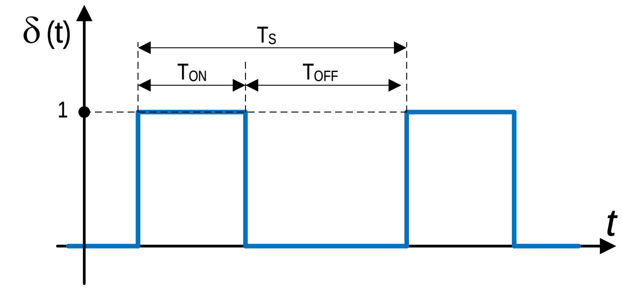


- SISTEMA DE ESTRUCTURA VARIABLE
- NO LINEAL
- VARIANTE EN EL TIEMPO

SUPOSICIONES DE VALIDEZ:

- ESTACIONARIEDAD
- ESTRATEGIA DE CONTROL PWM (FREC. CONSTANTE)
- CCM ó DOS LLAVES CONTROLADAS
- PEQUEÑA SEÑAL / PERTURBACIÓN
- SECUENCIALIDAD DE ESTADOS (DOS ESTADOS)
- LINEALIDAD APLICABLE A/C ESTRUCTURA
- LIMITACIÓN DINÁMICA (INTERÉS EN PROMEDIOS)

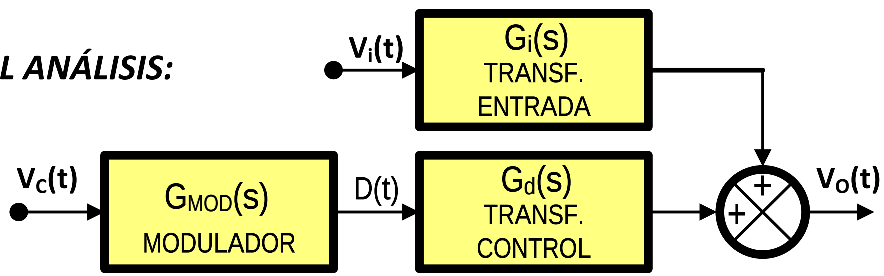
CICLO DE TRABAJO (DEFINICIÓN)



- SEÑAL CONTROL BINARIA
- DEFINE DOS ESTADOS TOPOLÓGICOS

$$d(t) \triangleq \int_{t}^{t+T_S} \delta(t).dt = \frac{T_{ON}(t)}{T_S}$$

OBJETIVO DEL ANÁLISIS:



DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA:

$$\dot{X} = A.X + B.V_I$$
$$V_O = C.X$$

$$\dot{X} = A_1.X + B_1.V_I$$
$$V_O = C_1.X$$

ESTADO 1

$$\dot{X} = A_2.X + B_2.V_I$$
$$V_O = C_2.X$$

ESTADO 2

$$A = A_1.D + A_2.(1-D)$$
$$B = B_1.D + B_2.(1-D)$$
$$C = C_1.D + C_2.(1-D)$$

PROMEDIACIÓN

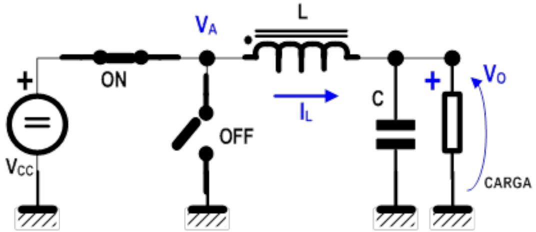
DECOMPOSICIÓN DE V.E.

$$V_K = \overline{V_K} + \widetilde{v_K}$$

MODELIZACIÓN POR PROMEDIACIÓN DE ESTADOS

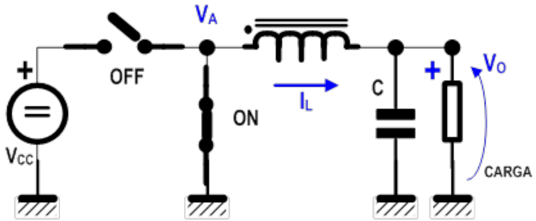
ESTADO 1: $0 < t < D.T_S$

$$\dot{X} = A_1.X + B_1.V_i$$
$$V_o = C_1.X$$



ESTADO 2 : $D.T_S < t < T_S$

$$\dot{X} = A_2.X + B_2.V_i$$
$$V_o = C_2.X$$



VECTOR DE ESTADO

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad Dim(X) = m\ x\ 1$$

$$Dim(A) = m\ x\ m$$
$$Dim(B) = m\ x\ 1$$
$$Dim(C) = 1\ x\ m$$

MODELO PROMEDIADO

$$\begin{cases} \dot{X} = [A_1.D + A_2.(1-D)].X + [B_1.D + B_2.(1-D)].V_i \\ V_o = [C_1.D + C_2.(1-D)].X \end{cases}$$

DEFINICIÓN:

$$\begin{cases} \boldsymbol{A} \triangleq [A_1.D + A_2.(1-D)] \\ \boldsymbol{B} \triangleq [B_1.D + B_2.(1-D)] \\ \boldsymbol{C} \triangleq [C_1.D + C_2.(1-D)] \end{cases}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \dot{X} &= \boldsymbol{A}.X + \boldsymbol{B}.V_i \\ V_o &= \boldsymbol{C}.X \end{aligned}}$$

COMPOSICIÓN DE BIAS + PEQUEÑA SEÑAL

$$X = \bar{X} + \tilde{x} \qquad D = \bar{D} + \tilde{d} \qquad V_i = \bar{V_i} + \tilde{v_i} \qquad V_o = \bar{V_o} + \widetilde{v_o}$$

MODELIZACIÓN POR PROMEDIACIÓN DE ESTADOS

CÁLCULO DE RELACIÓN DE CONVERSIÓN DE GRAN SEÑAL

$\tilde{x} = 0 \quad \tilde{d} = 0 \quad \tilde{v}_i = 0 \quad \widetilde{v_o} = 0 \quad \dot{\tilde{x}} = 0$

$\dot{\bar{X}} = 0$ ***Siempre se cumple, porque el sistema se encuentra en estado (de bias) estacionario***

$$\dot{\bar{X}} = \boldsymbol{A}.\bar{X} + \boldsymbol{B}.\bar{V}_i = 0 \rightarrow \bar{X} = -\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V}_i$$

Y sustituyendo:

$$\bar{V}_o = \boldsymbol{C}.\bar{X} = -\boldsymbol{C}.\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V}_i$$

RELACIÓN DE CONVERSIÓN DE GRAN SEÑAL:

$$\overline{V_o} = -\boldsymbol{C}.\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V}_i$$

CÁLCULO DE TRANSFERENCIA RESPECTO DE LA VARIABLE DE CONTROL $\tilde{d}$

Reescribiendo el modelo de sistema:

$$\begin{cases} \dot{X} = [A_1.D + A_2.(1-D)].X + [B_1.D + B_2.(1-D)].V_i \\ V_o = [C_1.D + C_2.(1-D)].X \end{cases}$$

Sustituir: $X = \bar{X} + \tilde{x} \quad D = \bar{D} + \tilde{d} \quad V_o = \bar{V}_o + \widetilde{v_o}$ ***Asumiendo en este caso que:*** $\tilde{v}_i = 0 \quad \dot{\bar{X}} = 0$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \cancel{\boldsymbol{A}.\bar{X} + \boldsymbol{B}.\bar{V}_i} + \boldsymbol{A}.\tilde{x} + [A_1.\tilde{d} + A_2.(-\tilde{d})].\bar{X} + \cancel{\boldsymbol{B}.\tilde{v}_i} + [B_1.\tilde{d} + B_2.(-\tilde{d})].\bar{V}_i \\ \cancel{\bar{V}_o} + \widetilde{v_o} = \cancel{\boldsymbol{C}.\bar{X}} + [C_1.\tilde{d} + C_2.(-\tilde{d})].\bar{X} + \boldsymbol{C}.\tilde{x} \end{cases}$$

Donde se omitieron los términos productos de segundo orden: $\tilde{d}.\tilde{x};\ \tilde{d}.\tilde{v}_i$ ***Con lo cual:***

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \boldsymbol{A}.\tilde{x} + [A_1.-A_2.].\tilde{d}.\bar{X} + [B_1.-B_2.].\tilde{d}.\bar{V}_i \\ \widetilde{v_o} = [C_1.-C_2].\tilde{d}.\bar{X} + \boldsymbol{C}.\tilde{x} \end{cases}$$

$\Rightarrow \mathcal{L}$ ***En el plano transformado:***

CÁLCULO DE TRANSFERENCIA RESPECTO DE LA VARIABLE DE CONTROL (cont.)

$$\begin{cases} [s.Id - A].\tilde{x} = [A_1 - A_2].\tilde{d}.\bar{X} + [B_1 - B_2].\tilde{d}.\bar{V_i} \\ \widetilde{v_o} = [C_1 - C_2].\tilde{d}.\bar{X} + \boldsymbol{C}.\tilde{x} \end{cases}$$

De la primer ecuación se obtiene: $\tilde{x} = [s.Id - A]^{-1}.[A_1 - A_2].\tilde{d}.\bar{X} + [s.Id - A]^{-1}.[B_1 - B_2].\tilde{d}.\bar{V_i}$

Y por operación en estado estacionario se sabe que: $\bar{X} = -\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V_i}$

Con lo cual, reemplazando:

$$\widetilde{v_o} = [C_1 - C_2].\tilde{d}.\left[-\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V_i}\right] + \boldsymbol{C}.\left\{[s.Id - A]^{-1}.[A_1 - A_2].\tilde{d}.\left[-\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\bar{V_i}\right] + [s.Id - A]^{-1}.[B_1 - B_2].\tilde{d}.\bar{V_i}\right\}$$

Finalmente resulta:

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA RESPECTO DE LA VARIABLE DE CONTROL

$$G_{\tilde{d}} = \frac{\widetilde{v_o}}{\tilde{d}} = \bar{V_i}.[C_2 - C_1].\left[\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}.\right] + \bar{V_i}.\boldsymbol{C}.[s.Id - A]^{-1}.\left\{[A_2 - A_1].\left[\boldsymbol{A}^{-1}.\boldsymbol{B}\right] + B_1 - B_2\right\}$$

MODELIZACIÓN POR PROMEDIACIÓN DE ESTADOS

CÁLCULO DE TRANSFERENCIA RESPECTO DE LA PERTURBACIÓN DE POTENCIA: $\tilde{v}_i$

Reescribiendo el modelo de sistema:

$$\begin{cases} \dot{X} = [A_1.D + A_2.(1-D)].X + [B_1.D + B_2.(1-D)].V_i \\ V_o = [C_1.D + C_2.(1-D)].X \end{cases}$$

Sustituir: $X = \bar{X} + \tilde{x}$ $\quad V_i = \bar{V_i} + \tilde{v}_i$ $\quad V_o = \bar{V_o} + \tilde{v_o}$ $\qquad$ ***Asumiendo en este caso que:*** $\tilde{d} = 0 \quad \dot{\bar{X}} = 0$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \cancel{\boldsymbol{A}.\bar{X} + \boldsymbol{B}.\bar{V_i}} + \boldsymbol{A}.\tilde{x} + B.\tilde{v}_i \\ \cancel{\bar{V_o}} + \tilde{v_o} = \cancel{\boldsymbol{C}.\bar{X}} + \boldsymbol{C}.\tilde{x} \end{cases}$$

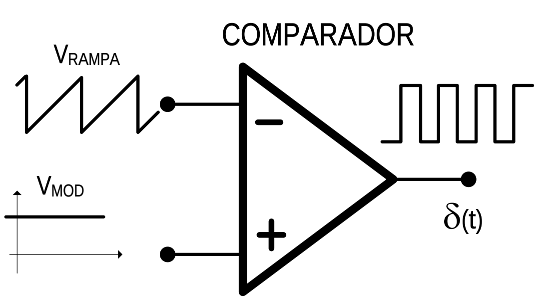
$\longrightarrow \quad \tilde{x} = [s.Id - A]^{-1}.\boldsymbol{B}.\tilde{v}_i$

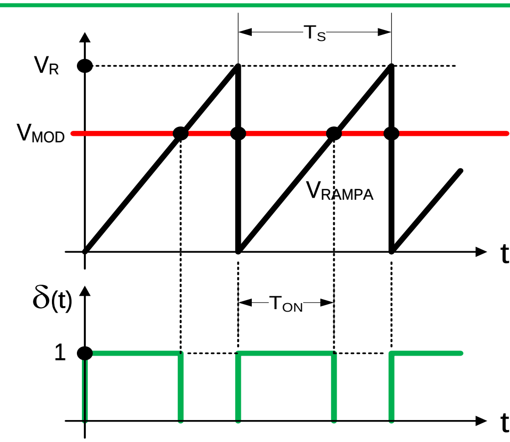
$\longrightarrow \quad \tilde{v_o} = \boldsymbol{C}.\tilde{x} \rightarrow \tilde{v_o} = \boldsymbol{C}.[s.Id - A]^{-1}.\boldsymbol{B}.\tilde{v}_i$

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA RESPECTO DE LA PERTURBACIÓN DE POTENCIA

$$G_{\tilde{v}i} = \frac{\tilde{v_o}}{\tilde{v}_i} = \boldsymbol{C}.[s.Id - A]^{-1}.\boldsymbol{B}$$

MODULADOR PWM:





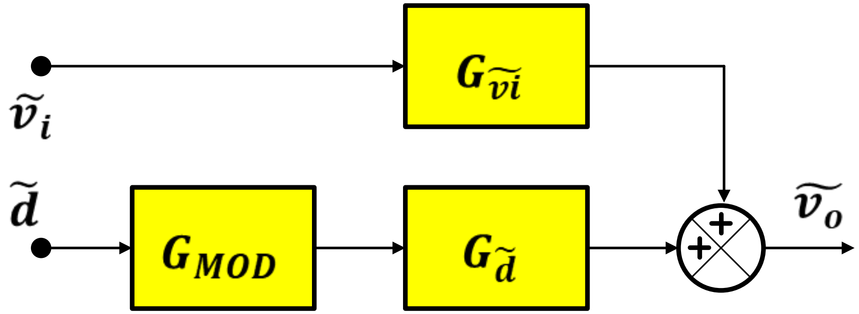
$$0 \le V_{MOD} \le V_R$$

GANANCIA DEL MODULADOR PWM

$$G_{MOD} = \frac{d(t)}{V_{MOD}} = \frac{1}{V_R}$$

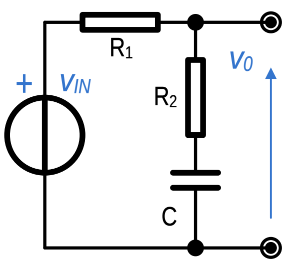
MODELIZACIÓN POR PROMEDIACIÓN DE ESTADOS

MODELO DE CONTROL



$$\tau_1 = C.(R_1 + R_2)$$
$$\tau_2 = C.R_2$$

RESPUESTA DE SISTEMA CERO LHP + POLO LHP



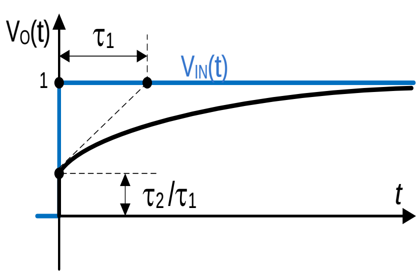
$$G(s) = \frac{V_O(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{(1 + s.\tau_2)}{(1 + s.\tau_1)}$$

ESCALÓN UNITARIO:

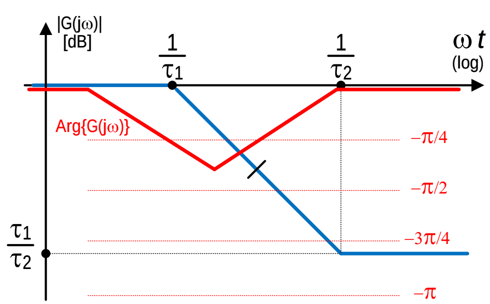
$$V_{IN}(s) = \frac{1}{s} \rightarrow V_O(s) = \frac{1}{s} - \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{(1 + s.\tau_1)}$$

$$\rightarrow L^{-1}\{.\} \rightarrow v_O(t) = u(t) - \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{\tau_1}.e^{-t/\tau_1}$$

RESPUESTA TEMPORAL:

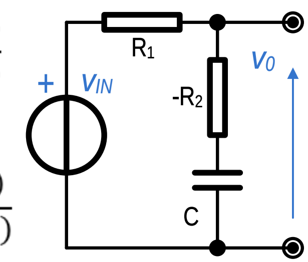


RESPUESTA FRECUENCIAL:



RESPUESTA DE SISTEMA CERO RHP + POLO LHP

$$G(s) = \frac{V_O(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{(1 - s.\tau_2)}{(1 + s.\tau_1)}$$

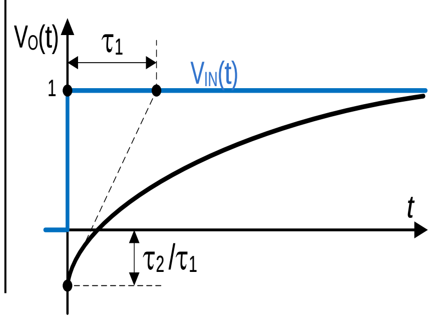


ESCALÓN UNITARIO:

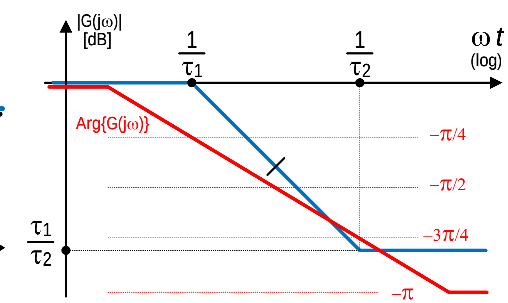
$$V_{IN}(s) = \frac{1}{s} \rightarrow V_O(s) = \frac{1}{s} - \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{(1 + s.\tau_1)}$$

$$\rightarrow L^{-1}\{.\} \rightarrow v_O(t) = u(t) - \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_1}.e^{-t/\tau_1}$$

RESPUESTA TEMPORAL:

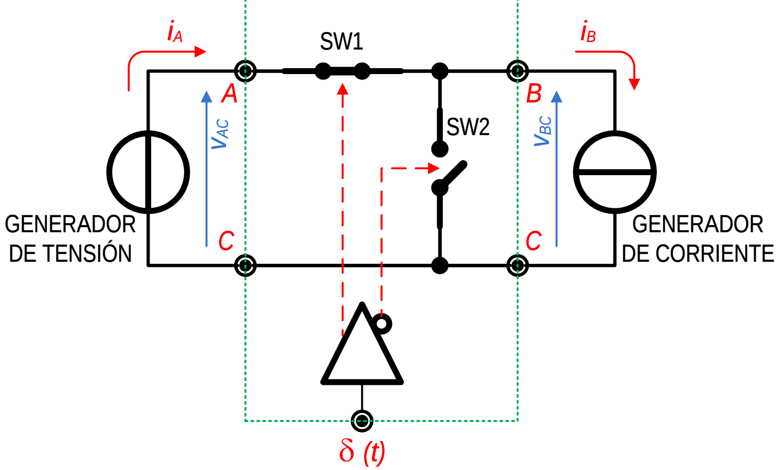


RESPUESTA FRECUENCIAL:



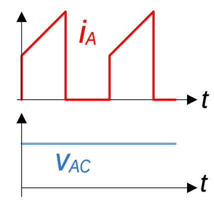
LINEALIZACIÓN DE LA CÉLULA ELEMENTAL DE CONMUTACIÓN

CÉLULA ELEMENTAL
DE CONMUTACIÓN



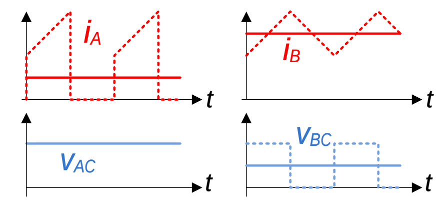
RELACIONES ENTRE LAS
VARIABLES INSTANTÁNEAS:

$$v_{BC}(t) = \delta(t).v_{AC}(t)$$
$$i_A(t) = \delta(t).i_B(t)$$

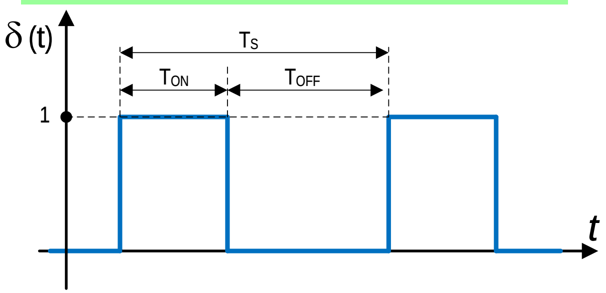


RELACIONES ENTRE LAS
VARIABLES PROMEDIO:

$$v_{BC} = d(t).v_{AC}$$
$$i_A = d(t).i_B$$



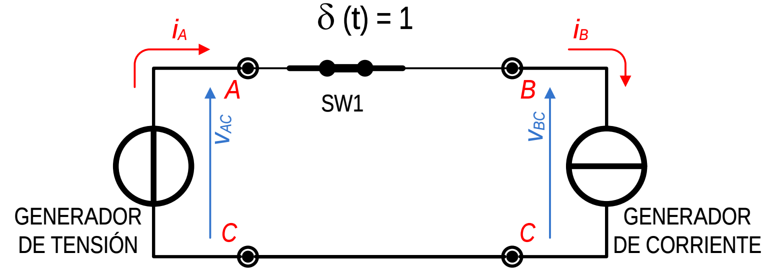
CICLO DE TRABAJO (DEFINICIÓN)



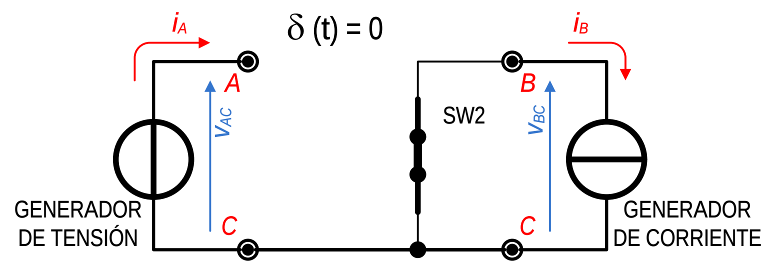
- SEÑAL CONTROL BINARIA FUNCIÓN DEL TIEMPO
- DEFINE DOS ESTADOS TOPOLÓGICOS

$$d(t) \triangleq \int_{t}^{t+T_S} \delta(t).dt = \frac{T_{ON}(t)}{T_S}$$

δ (t) = 1

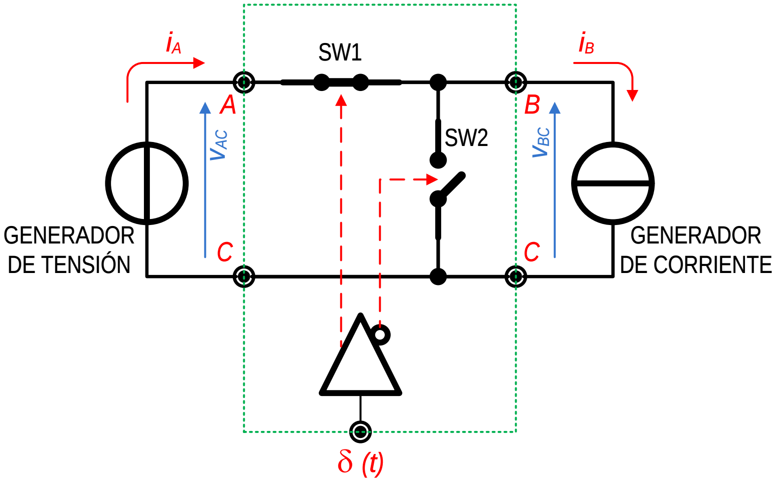


δ (t) = 0



LINEALIZACIÓN DE LA CÉLULA ELEMENTAL DE CONMUTACIÓN

CÉLULA ELEMENTAL DE CONMUTACIÓN



DECOMPOSICIÓN DE VARIABLES

$$v \rightarrow V + \tilde{v}$$
$$i \rightarrow I + \tilde{\imath}$$
$$d \rightarrow D + \tilde{d}$$

$$\begin{cases} I_A + \tilde{\imath}_A = (D + \tilde{d}).(I_B + \tilde{\imath}_B) \\ V_{BC} + \widetilde{v_{BC}} = (D + \tilde{d}).(V_{AC} + \widetilde{v_{AC}}) \end{cases}$$

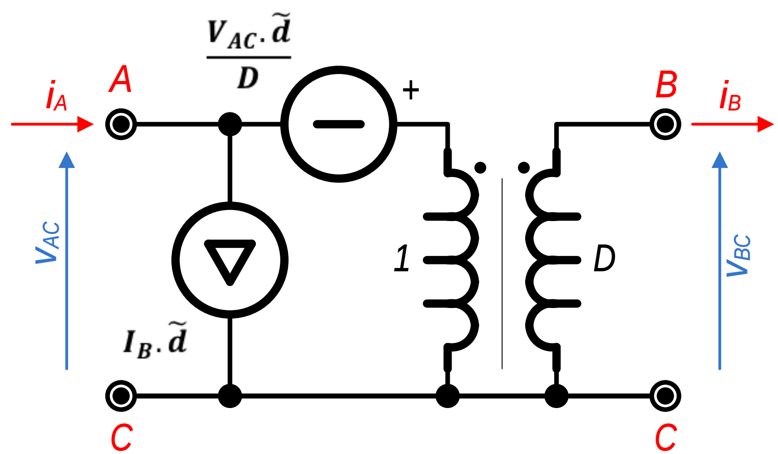
SOLUCIÓN DC (SS)

$$I_A = D.I_B$$
$$V_{BC} = D.V_{AC}$$

SOLUCIÓN AC (SS)

$$\tilde{\imath}_A = \tilde{d}.I_B + \tilde{\imath}_B.D$$
$$\widetilde{v_{BC}} = \tilde{d}.V_{AC} + \widetilde{v_{AC}}.D$$

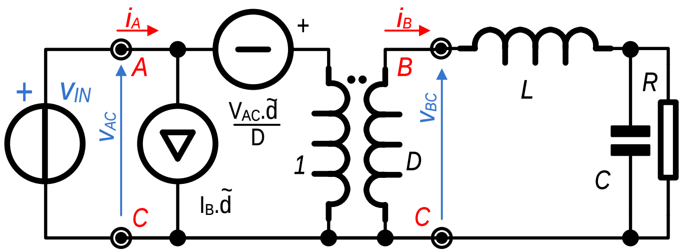
$$\boldsymbol{I_A = D.I_B}$$
$$\boldsymbol{\tilde{\imath}_A = \tilde{d}.I_B + \tilde{\imath}_B.D}$$



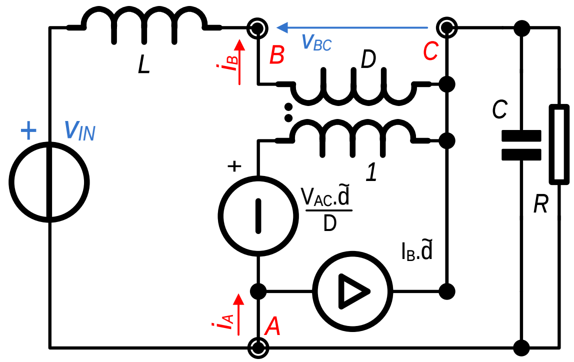
$$\boldsymbol{V_{BC} = D.V_{AC}}$$
$$\boldsymbol{\widetilde{v_{BC}} = \tilde{d}.V_{AC} + \widetilde{v_{AC}}.D}$$

CÉLULA PWM ELEMENTAL LINEALIZADA

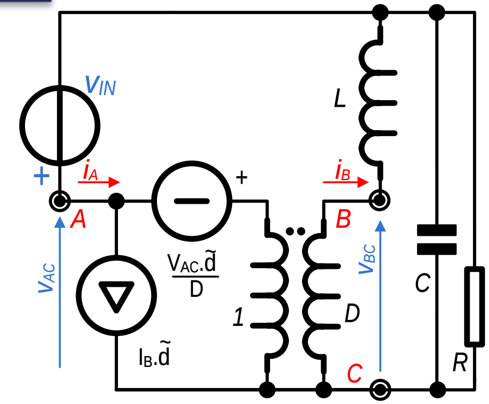
DETERMINACIÓN ALTERNATIVA DE LAS FUNCIONES TRANSFERENCIA



BUCK (FORWARD, STEP DOWN)



BOOST (STEP UP)



FLYBACK (STEP UP/DOWN)