

Amplificadores clase E de potencia sintonizados

Departamento de Electrotecnia
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata

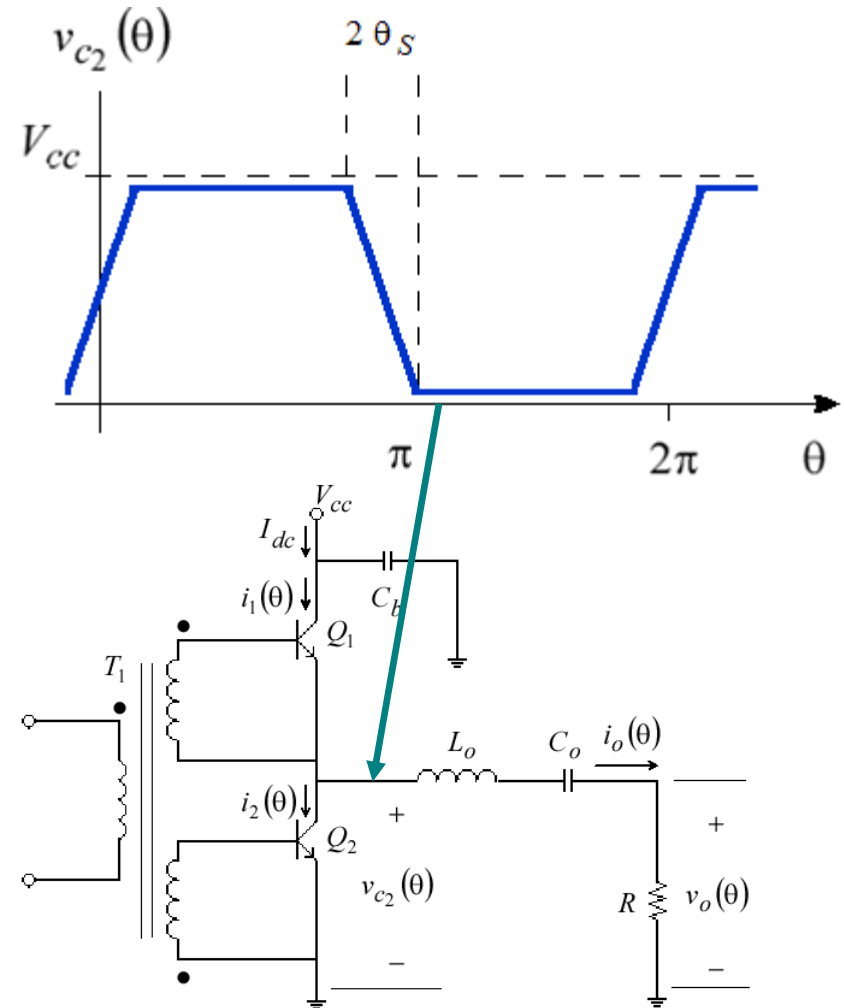
Amplificador clase D: velocidad de conmutación

Habíamos visto que durante la transición se disipaba potencia debido a $(i \times V) \neq 0$

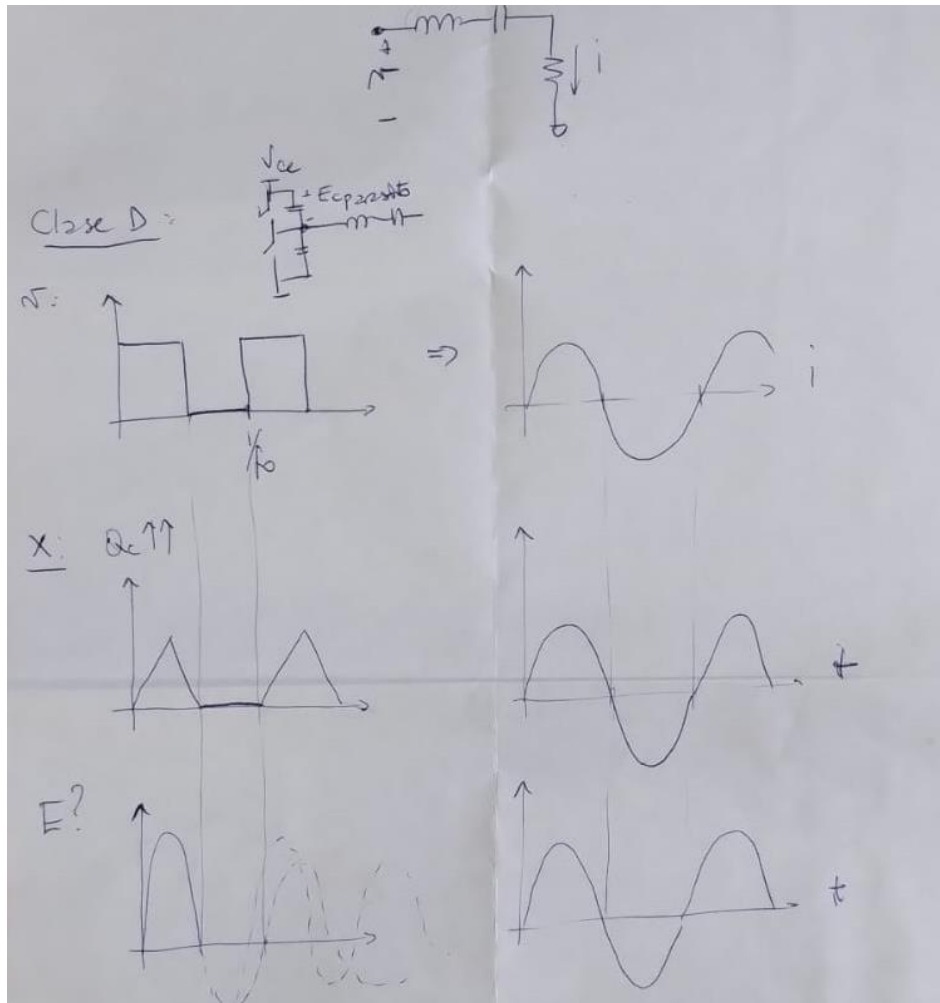
Influencia de la velocidad de conmutación de los transistores (producto $i \times V$ durante la conmutación):

$$\eta_3 = \frac{\sin \theta_s}{\theta_s}$$

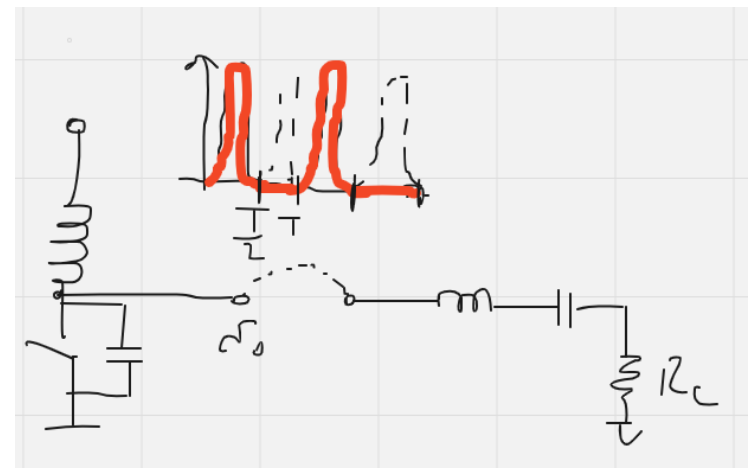
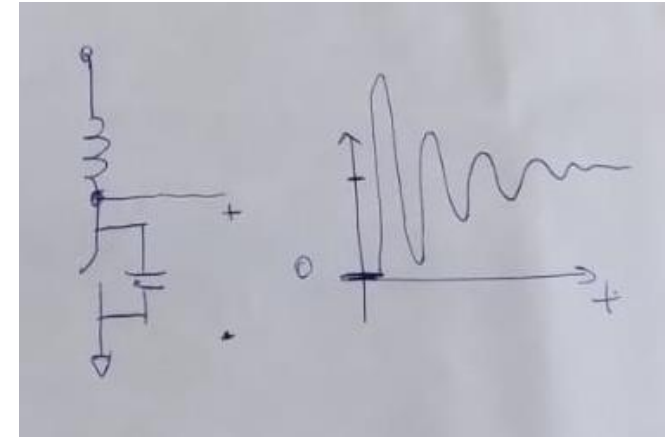
Hay una energía que se disipa en cada ciclo de la señal y es debida a la almacenada en las capacidades de salida de los transistores (C_o)



¿Cómo hago para conmutar con tensión cero en la llave (para anular $i \times V \dots$)



Idea:



PowerMOS transistors

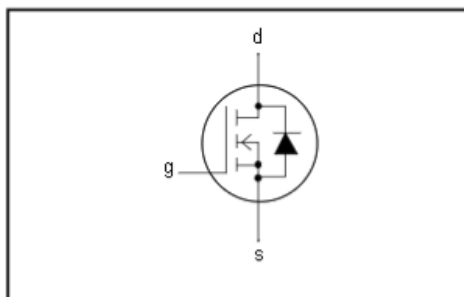
Avalanche energy rated

IRFP460

FEATURES

- Repetitive Avalanche Rated
- Fast switching
- Stable off-state characteristics
- High thermal cycling performance
- Low thermal resistance

SYMBOL



QUICK REFERENCE DATA

$$V_{DSS} = 500 \text{ V}$$

$$I_D = 20 \text{ A}$$

$$R_{DS(ON)} \leq 0.27 \Omega$$

GENERAL DESCRIPTION

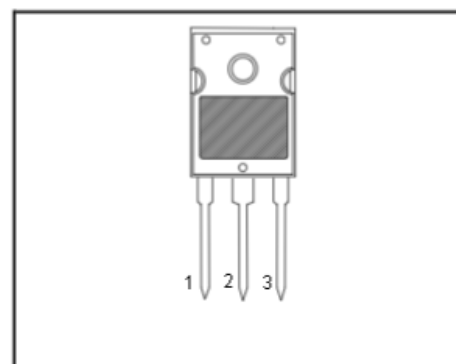
N-channel, enhancement mode field-effect power transistor, intended for use in off-line switched mode power supplies, T.V. and computer monitor power supplies, d.c. to d.c. converters, motor control circuits and general purpose switching applications.

The IRFP460 is supplied in the SOT429 (TO247) conventional leaded package.

PINNING

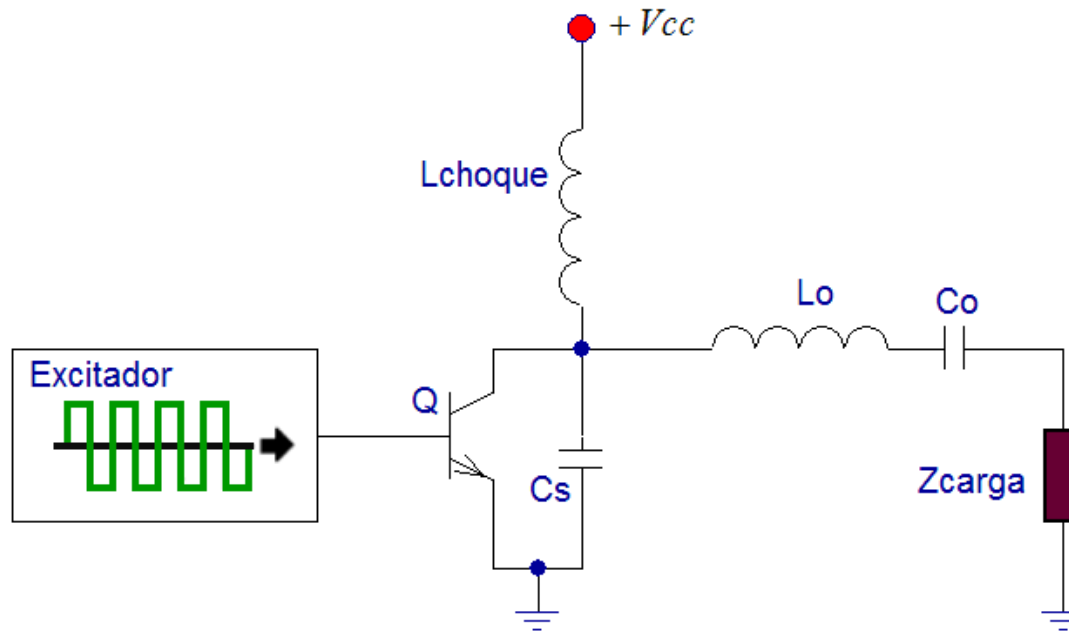
PIN	DESCRIPTION
1	gate
2	drain
3	source
tab	drain

SOT429 (TO247)



		bond pad				
C_{iss}	Input capacitance	$V_{GS} = 0 \text{ V}; V_{DS} = 25 \text{ V}; f = 1 \text{ MHz}$	-	3000	-	pF
C_{oss}	Output capacitance		-	480	-	pF
C_{rss}	Feedback capacitance		-	270	-	pF

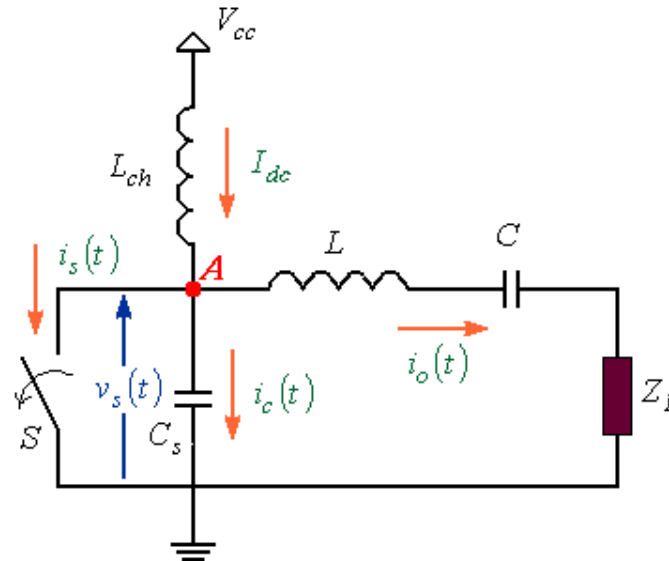
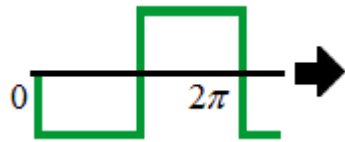
Amplificador clase E



Amplificador clase E

Circuito equivalente de un amplificador de potencia clase E

Ciclo de trabajo = 50%



Llave abierta:

$$i_c(t) = I_{dc} - i_o(t) \quad 0 \leq \omega_s t \leq \pi$$

Llave cerrada:

$$i_s(t) = I_{dc} - i_o(t) \quad \pi \leq \omega_s t \leq 2\pi$$

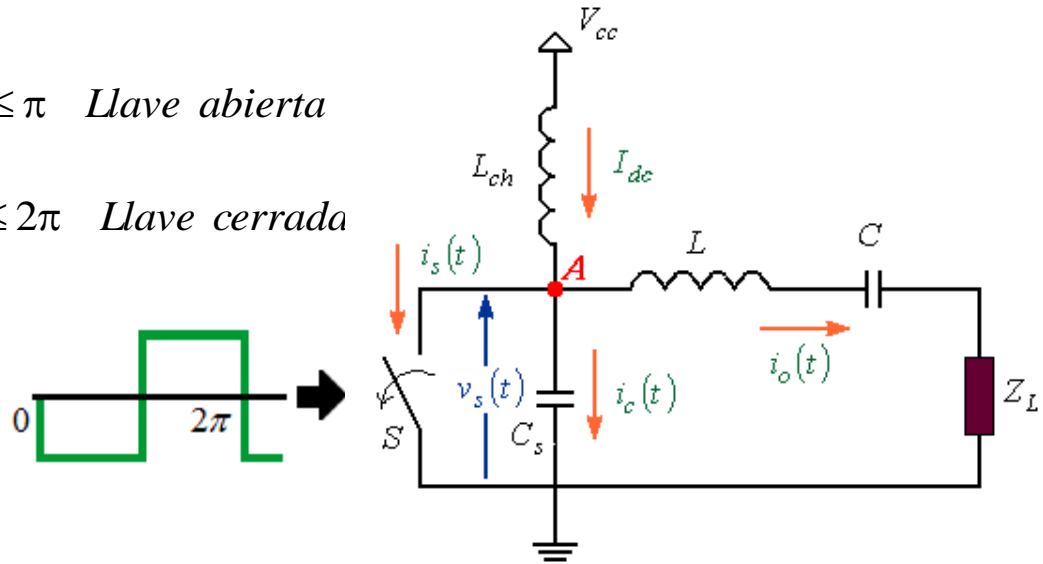
?

Amplificador clase E

Análisis del nodo A

$$i_c(t) = I_{dc} - i_o(t) \longrightarrow 0 \leq \omega_s t \leq \pi \quad \text{Llave abierta}$$

$$i_s(t) = I_{dc} - i_o(t) \longrightarrow \pi \leq \omega_s t \leq 2\pi \quad \text{Llave cerrada}$$



Proponemos que:

$$i_o(t) = \alpha \cdot I_{dc} \sin(\omega_s t + \phi)$$

Entonces

$$i_c(t) = I_{dc} (1 - \alpha \cdot \sin(\omega_s t + \phi)) \longrightarrow 0 \leq \omega_s t \leq \pi$$

$$i_s(t) = I_{dc} (1 - \alpha \cdot \sin(\omega_s t + \phi)) \longrightarrow \pi \leq \omega_s t \leq 2\pi$$

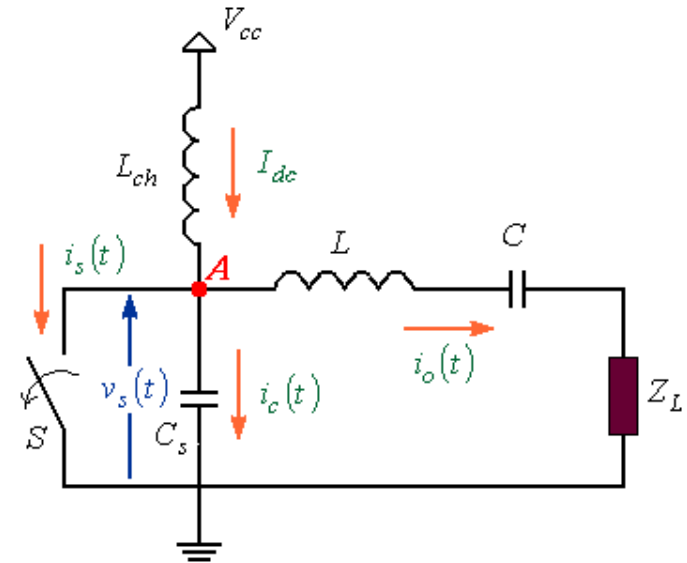
Amplificador clase E

Cálculo de la tensión en la llave

$0 \leq \omega_s t \leq \pi$ Llave abierta

$$i_c(t) = C_s \frac{dv_s}{dt} \Rightarrow v_s(t) = \frac{1}{C_s} \int_0^t i_c(\tau) d\tau$$

$$v_s(t) = \frac{I_{dc}}{C_s} \int_0^t (1 - \alpha \cdot \sin(\omega_s \tau + \phi)) d\tau \Rightarrow v_s(t) = \frac{I_{dc}}{C_s} \left(\tau - \alpha \left(\frac{-\cos(\omega_s \tau + \phi)}{\omega_s} \right) \right) \Bigg|_0^t$$



$$\Rightarrow v_s(t) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} \left\{ \left[\omega_s t - \alpha \cdot (-\cos(\omega_s t + \phi)) \right] - \left[\omega_s \cdot 0 - \alpha \cdot (-\cos(\omega_s \cdot 0 + \phi)) \right] \right\} =$$

$$= \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} \left((\omega_s t + \alpha \cos(\omega_s t + \phi)) + \cos(\phi) \right)$$

$0 \leq \omega_s t \leq \pi$ Llave abierta

Y cuando la llave está cerrada...

$$\pi \leq \omega_s t \leq 2\pi \quad \text{Llave cerrada}$$

$$v_s(t) = 0$$

Resumen:

1) **Premisa: corriente sinusoidal a la salida**

$$i_o(t) = \alpha \cdot I_{dc} \sin(\omega_s t + \phi)$$

2) $0 \leq \omega_s t \leq \pi$ Llave abierta

$$v_s(t) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} \left(\left(\omega_s t + \alpha \cos(\omega_s t + \phi) \right) + \cos(\phi) \right)$$

3) $\pi \leq \omega_s t \leq 2\pi$ Llave cerrada

$$v_s(t) = 0$$

Voy a exigirles a estas ecuaciones que:

$$v_s \left[\frac{T_s}{2} \right] = 0$$

$$\frac{dv_s}{dt} \left[\frac{T_s}{2} \right] = i_s \left[\frac{T_s}{2} \right] = 0$$

Amplificador clase E

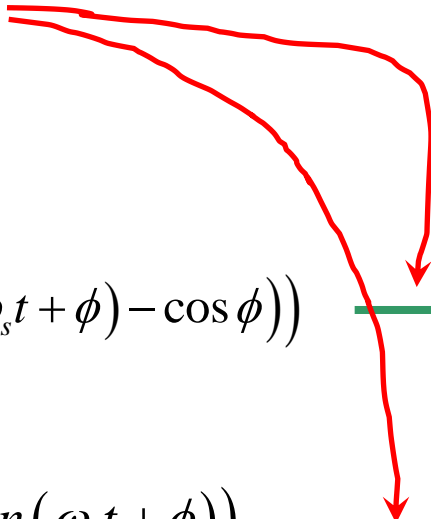
Condiciones para óptimo funcionamiento

Calculamos la tensión y la corriente en la llave para un ángulo de 180°

$$(\omega_s t) = \pi$$



$$t = \frac{\pi}{\omega_s}$$



$$v_s(t) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} (\omega_s t + \alpha \cdot (\cos(\omega_s t + \phi) - \cos \phi))$$



$$0 = (\pi + \alpha (\cos(\pi + \phi) - \cos \phi))$$

$$i_s(t) = I_{dc} (1 - \alpha \sin(\omega_s t + \phi))$$



$$0 = 1 - \alpha \sin(\pi + \phi)$$

Amplificador clase E

Cálculo de las constantes

$$\alpha = \frac{1}{\text{sen}(\pi + \phi)} = \frac{1}{\text{sen}\pi \cdot \cos\phi + \cos\pi \cdot \text{sen}\phi} = \frac{1}{-\text{sen}\phi}$$

$$\pi = \frac{\cos\pi \cdot \cos\phi - \text{sen}\pi \cdot \text{sen}\phi - \cos\phi}{\text{sen}\phi} = -\frac{2\cos\phi}{\text{sen}\phi}$$

$$b) \quad 0 = \left(\pi + \alpha \cdot (\cos(\pi + \phi) - \cos\phi) \right) \Rightarrow \tan\phi = -\frac{2}{\pi}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(-\frac{2}{\pi}\right) \approx -32,48^\circ$$

$$a) \quad 0 = 1 - \alpha \cdot \text{sen}(\pi + \phi)$$

Reemplazo
en a)

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4}} \approx 1,862$$

Amplificador clase E

Valores obtenidos para la tensión y corriente

Supusimos una corriente en la carga: $i_o(t) = \alpha \cdot I_{dc} \text{sen}(w_s t + \phi)$

Calculamos que deberá ser:

$$i_o(\theta) = 1,862 \cdot I_{dc} \text{sen}(\theta - 32,48^\circ) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

Y que:
$$v_s(t) = \frac{I_{dc}}{w_s C_s} (w_s t + \alpha \cdot (\cos(w_s t + \phi) - \cos \phi)) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq \pi$$

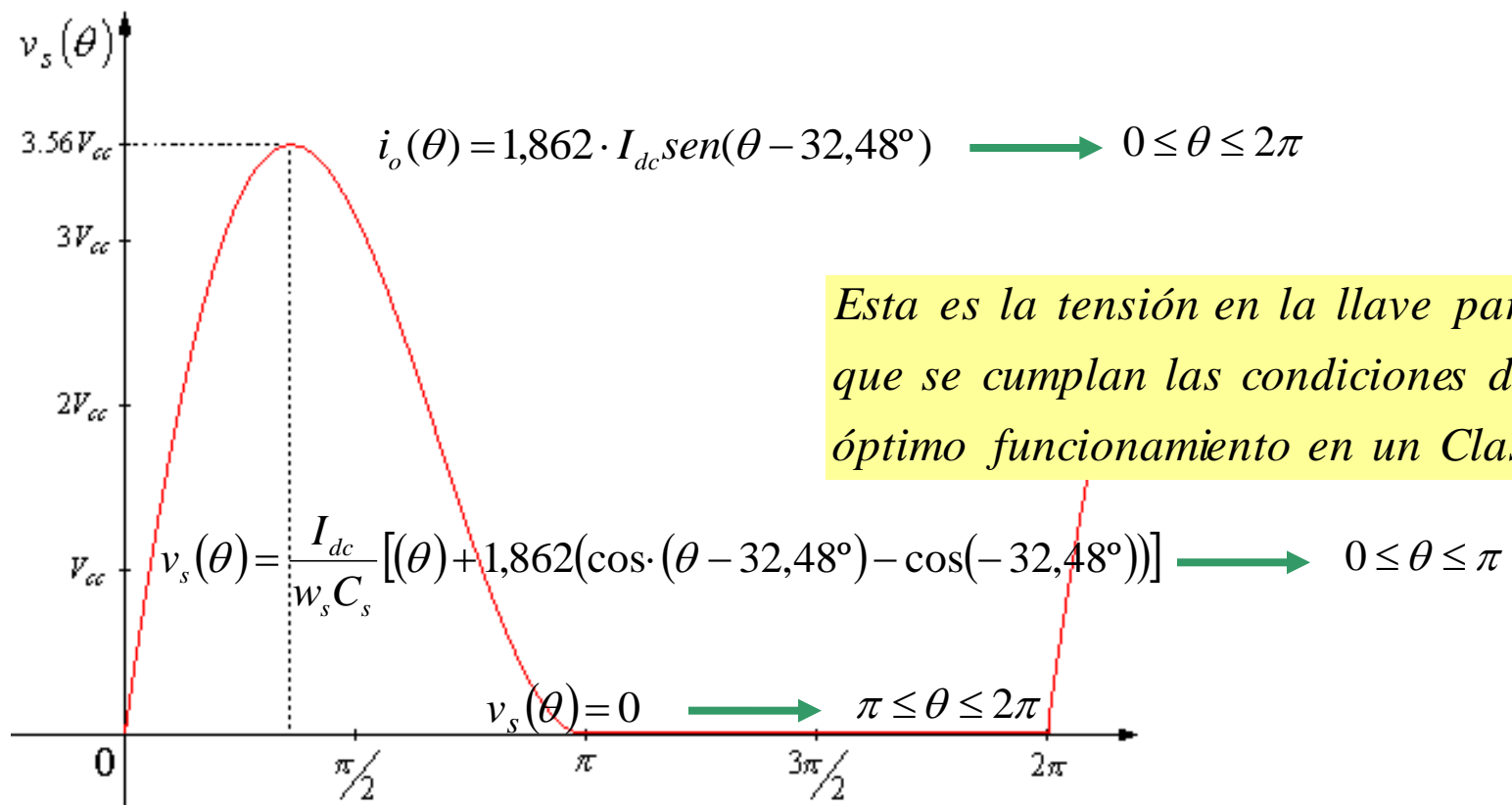
Reemplazando α y ϕ podemos expresarla como:

$$v_s(\theta) = \frac{I_{dc}}{w_s C_s} [(\theta) + 1,862(\cos(\theta - 32,48^\circ) - \cos(-32,48^\circ))] \longrightarrow 0 \leq \theta \leq \pi$$

$$v_s(\theta) = 0 \longrightarrow \pi \leq \theta \leq 2\pi$$

Amplificador clase E

Tensión y corriente aplicada a la carga



Amplificador clase E

Tensión y corriente aplicada a la carga

$$i_o(\theta) = 1,862 \cdot I_{dc} \sin(\theta - 32,48^\circ) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$v_s(\theta) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} [(\theta) + 1,862(\cos(\theta - 32,48^\circ) - \cos(-32,48^\circ))] \longrightarrow 0 \leq \theta \leq \pi$$

$$v_s(\theta) = 0 \longrightarrow \pi \leq \theta \leq 2\pi$$

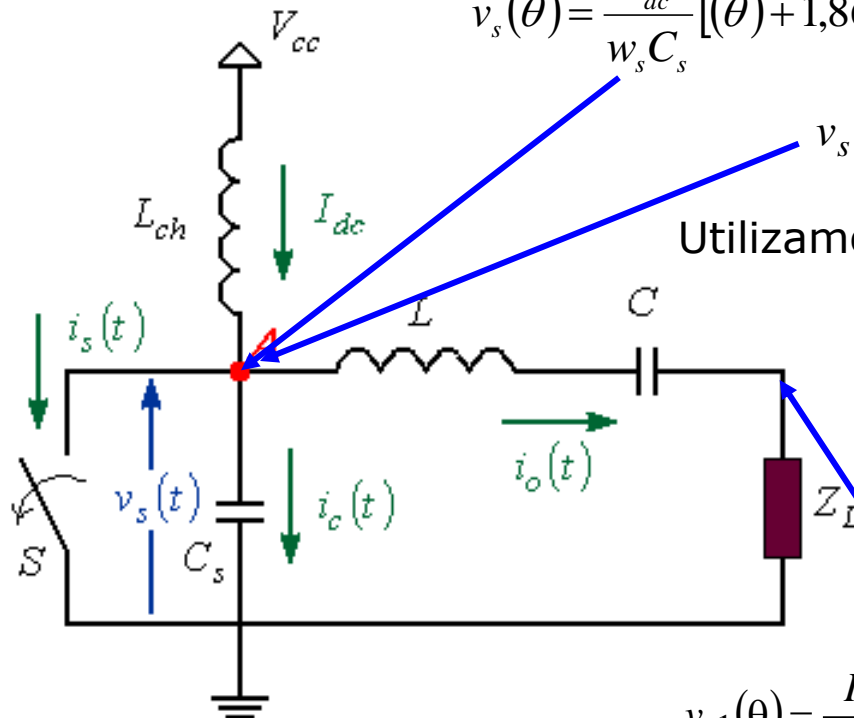
Utilizamos Fourier para ver que tensión verá la carga:

$$v_{s1}(t) = a_1 \cos(\omega_s t) + b_1 \sin(\omega_s t) = c_1 \sin(\omega_s t + \theta_1)$$

$$c_1 = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} 0.5216$$

$$\theta_{1rad} = 0.289$$

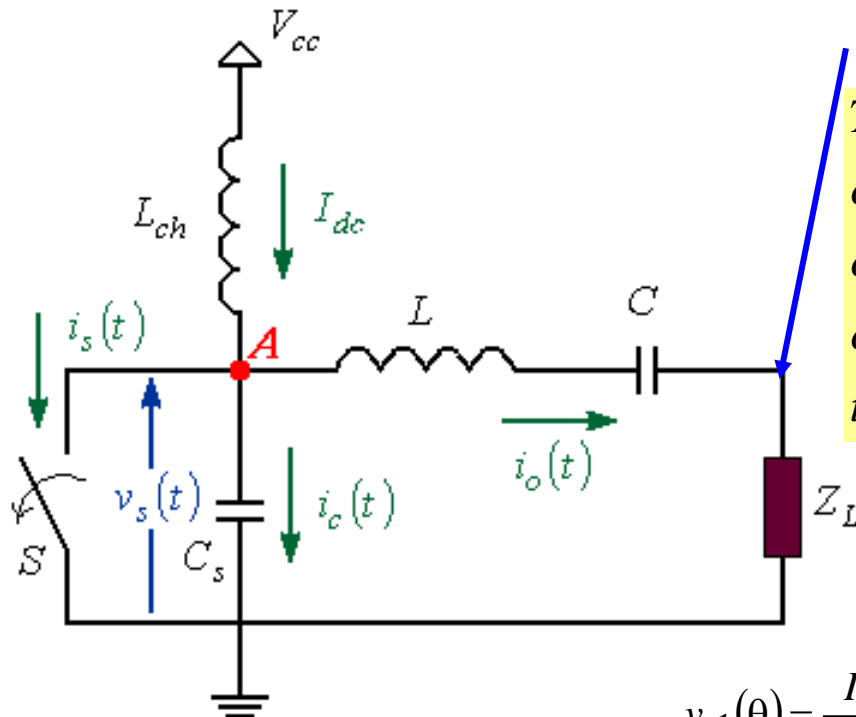
$$v_{s1}(\theta) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} 0.5216 \cdot \sin(\theta + 16.55^\circ) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq 2\pi$$



Amplificador clase E

Cálculo de la impedancia de carga

$$i_o(\theta) = 1,862 \cdot I_{dc} \cdot \sin(\theta - 32,48^\circ) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq 2\pi$$



Tenemos la tensión y la corriente que debería circular por la carga para que se cumplan las condiciones para un óptimo funcionamiento en clase E, podemos ahora calcular que valor deberá tener esa carga y que relación guarda con C_s .

$$C_s = \frac{0.28 \cdot \cos 49^\circ}{\omega_s R_L} = \frac{0.1836}{\omega_s R_L}$$

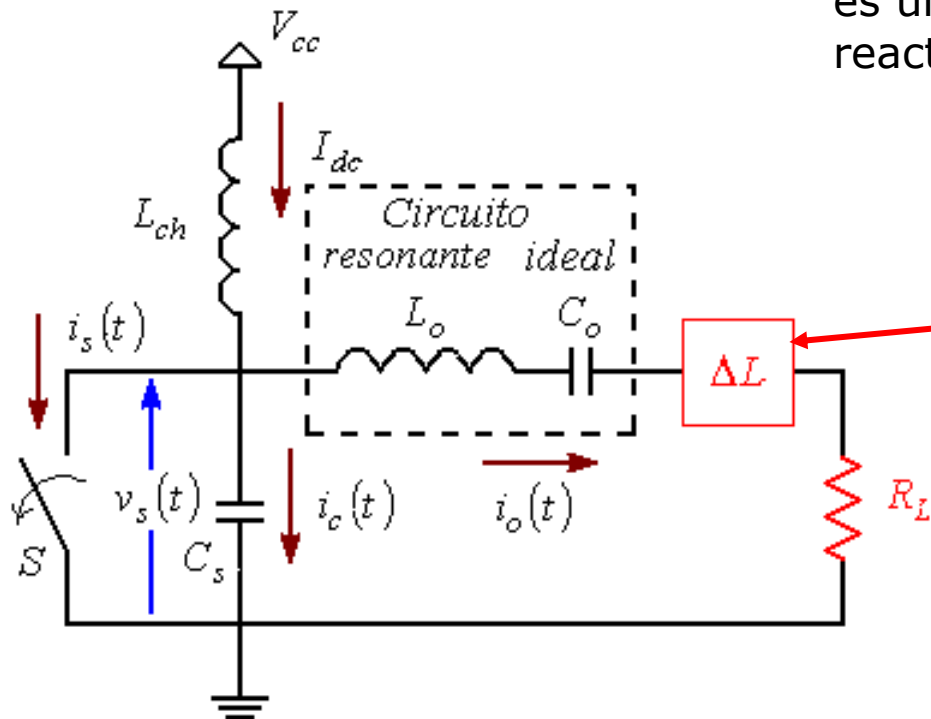
$$v_{s1}(\theta) = \frac{I_{dc}}{\omega_s C_s} 0.5216 \cdot \sin(\theta + 16.55^\circ) \longrightarrow 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$X_L = \tan 49^\circ R_L = 1.15 R_L$$

Amplificador clase E

Composición de la carga

Como se puede apreciar, la carga queda compuesta por la resistencia, que es un magnitud de diseño y por una parte reactiva cuyo valor depende de la anterior.

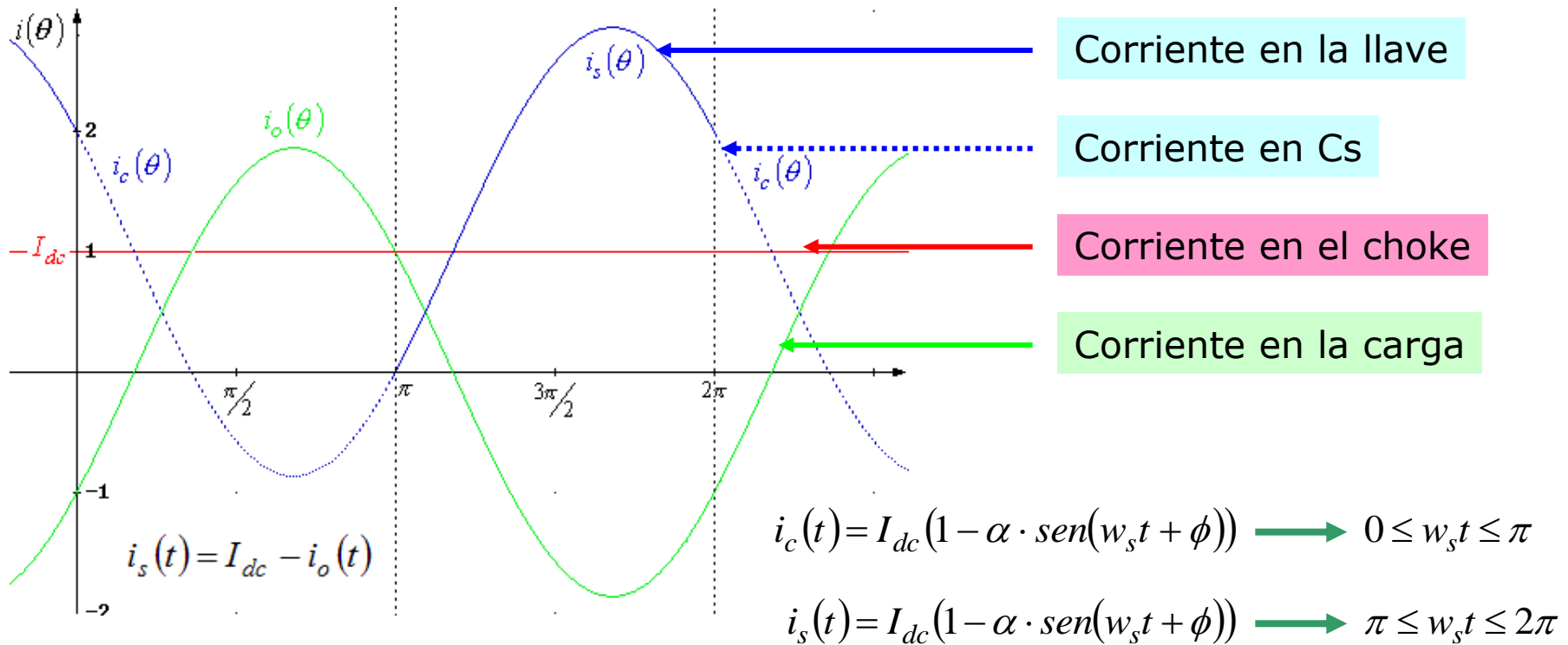


$$Z_L = \frac{0.28}{\omega_s C_s} (\cos 49^\circ + j \sin 49^\circ) = R_L + jX_L$$
 Constructivamente la parte reactiva de la carga deberá ser agregada, si ésta no la tuviere, quedando en serie con L_o , con lo que la inductancia total deberá tener un valor $L_o + \Delta L$.

$$X_L = \tan 49^\circ R_L \Delta L = 1.15 R_L \Delta L$$

Amplificador clase E

Formas de ondas de las corrientes



La corriente en la carga es la resultante de la corriente en continua, menos la del capacitor y la de la llave sumadas.