

ELECTRONICA APLICADA I

Profesor Titular Dr. Ing. Guillermo Riva

Profesor Adjunto Ing. Martin Guido

• EL TRANSISTOR (parte 3)

Contenido:

Concepto de máxima excursión simétrica (MES).

Seis variantes de circuitos amplificadores en configuración emisor común.

Ventajas y desventajas.

Análisis de potencia.

Potencia media suministrada por cualquier dispositivo lineal o no lineal.

Potencia media suministrada por la fuente de alimentación.

Potencia media disipada en la carga en corriente alterna.

Potencia media disipada en el colector.

Gráfica de potencia en función de la corriente pico de colector.

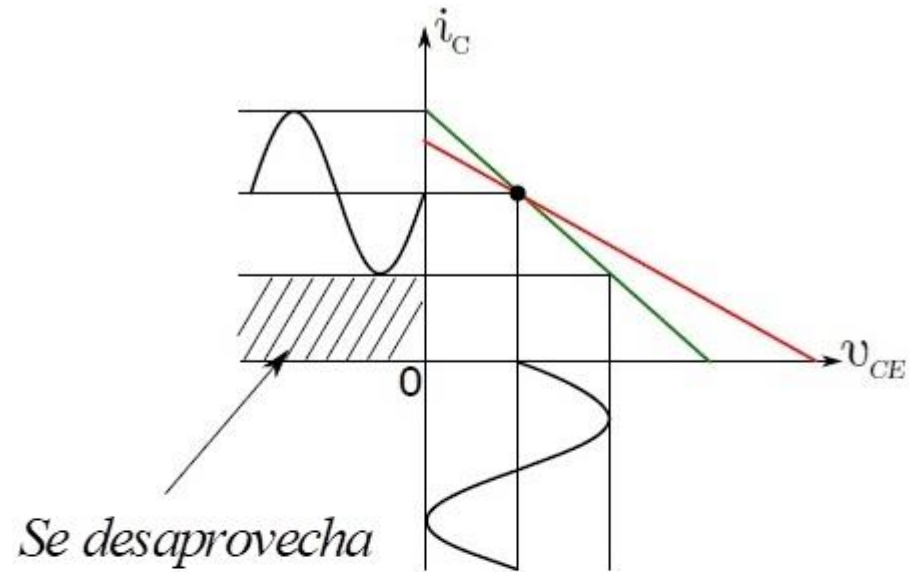
Rendimiento y factor de mérito.

Ejemplo de diseño de transistor como amplificador emisor común.

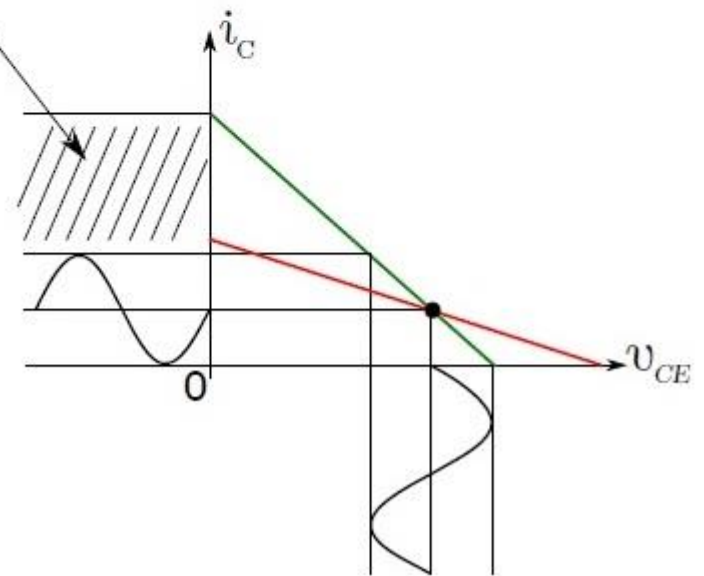
Ejemplo de diseño de transistor en conmutación.

Concepto de máxima excursión simétrica

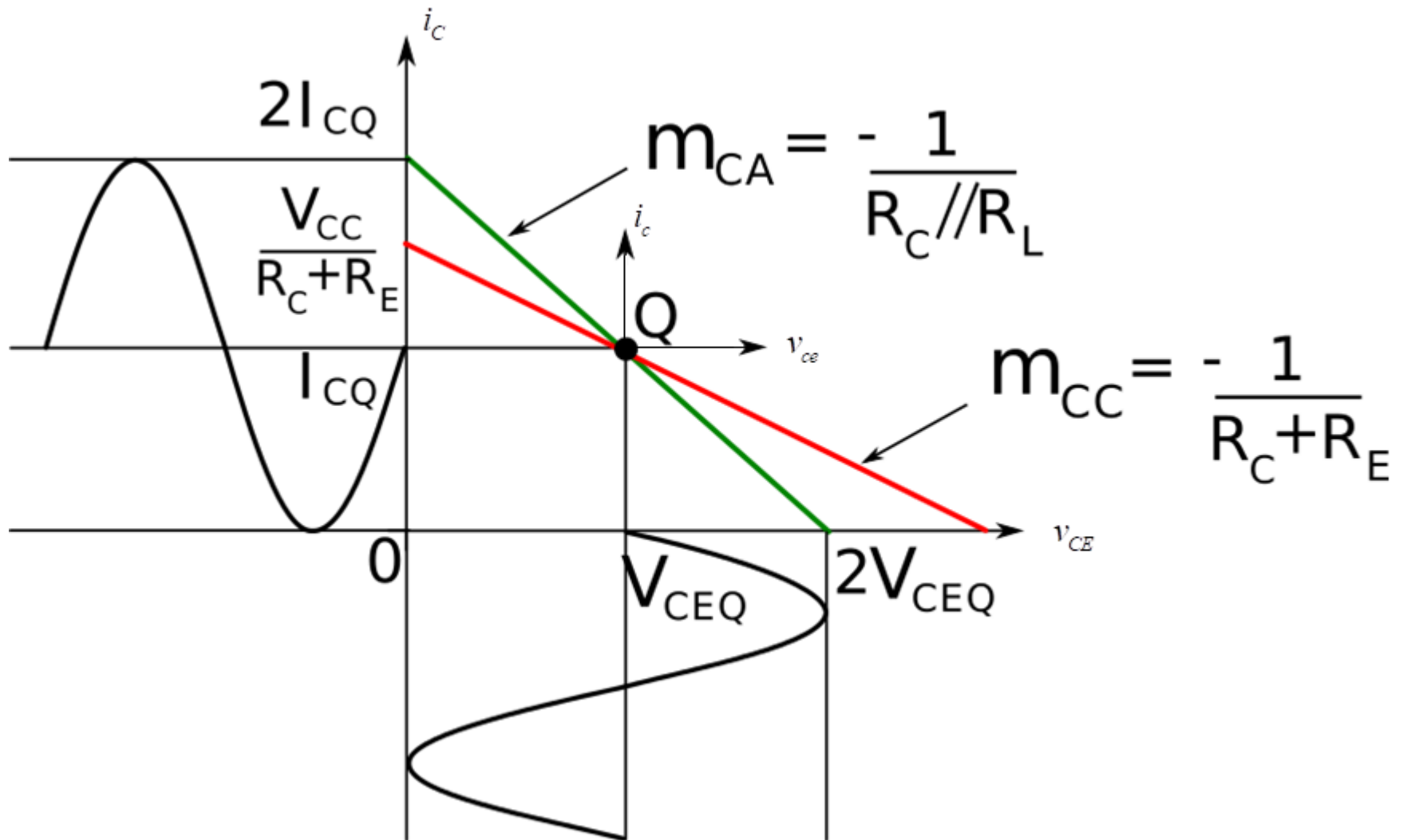
En la gráfica superior se observa que el punto Q está desplazado hacia la izquierda.



En la gráfica inferior se observa que el punto Q está desplazado hacia la derecha.



Concepto de máxima excursión simétrica.



Concepto de máxima excursión simétrica.

La ecuación de la recta de carga de C.A

$$i_c = -\frac{1}{R_C // R_L} v_{ce}$$

$$i_c - I_{CQ} = -\frac{1}{R_C // R_L} (v_{CE} - V_{CEQ})$$

$$\text{Cuando } v_{CE} = 0 \Rightarrow i_{C,\max} = I_{CQ} + \frac{V_{CEQ}}{R_C // R_L} \quad (1)$$

Para obtener MES el pto Q debe estar en el centro de la recta de carga de C.A de modo que:

$$i_{C,\max} = 2I_{CQ} \quad (2)$$

Igualando (1) y (2)

$$2I_{CQ} = I_{CQ} + \frac{V_{CEQ}}{R_C // R_L}$$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CEQ}}{R_C // R_L} \Rightarrow V_{CEQ} = I_{CQ} (R_C // R_L) \quad (3)$$

Concepto de máxima excursión simétrica.

La ecuación de la recta de carga de C.C

$$V_{CC} = V_{CEQ} + I_{CQ} (R_C + R_E)$$

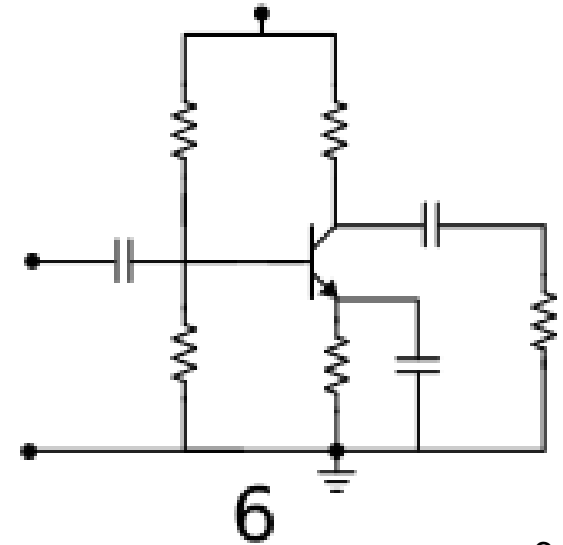
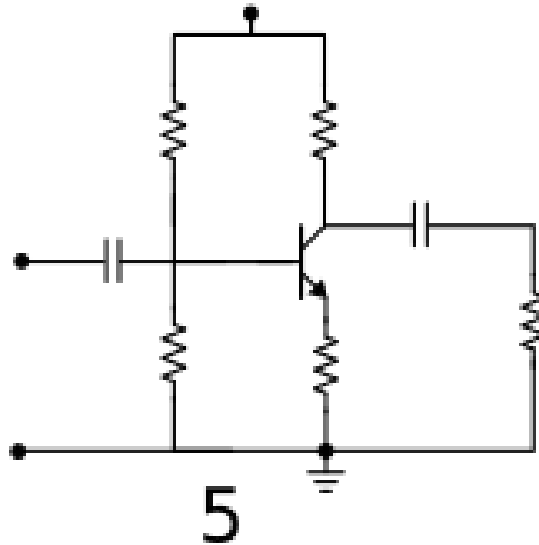
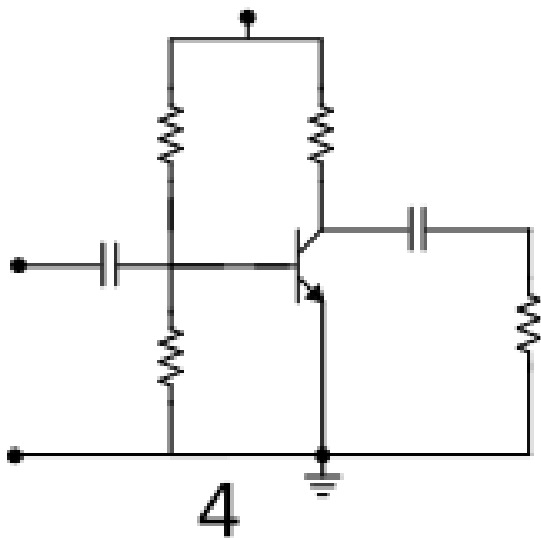
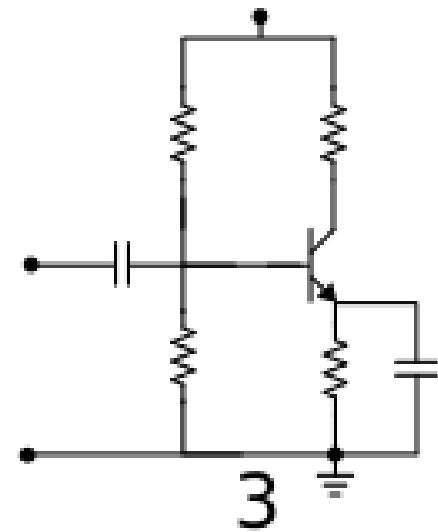
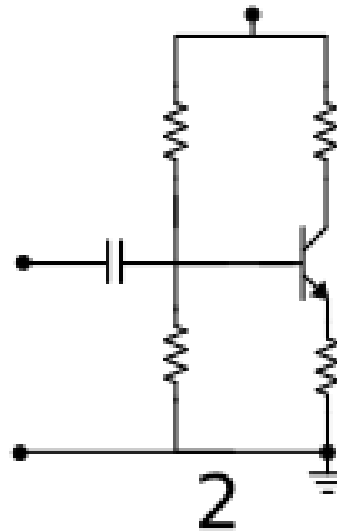
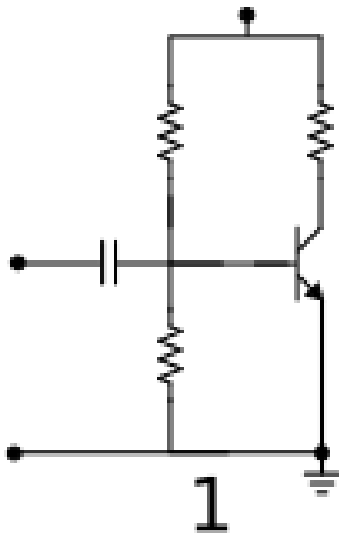
Reemplazando (3) en la ecuación anterior

$$V_{CC} = I_{CQ} (R_C // R_L) + I_{CQ} (R_E + R_C)$$

$$V_{CC} = I_{CQ} \{ (R_E + R_C) + (R_C // R_L) \}$$

$$I_{CQ(MES)} = \frac{V_{CC}}{\underbrace{(R_E + R_C)}_{R_{CC}} + \underbrace{(R_C // R_L)}_{R_{CA}}}$$

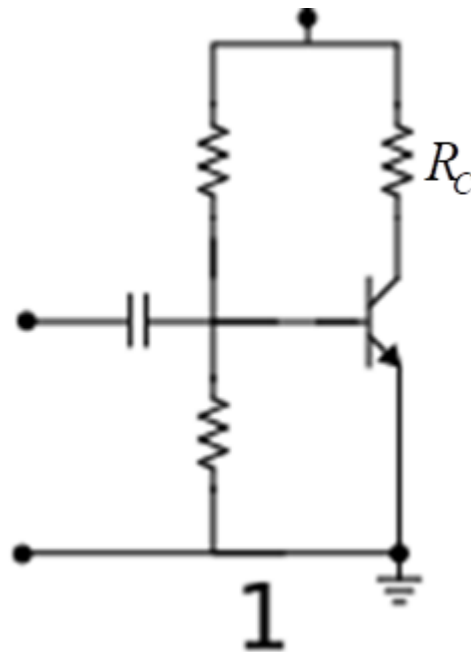
Seis variantes de circuitos amp. de Emisor Común



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

Caso 1

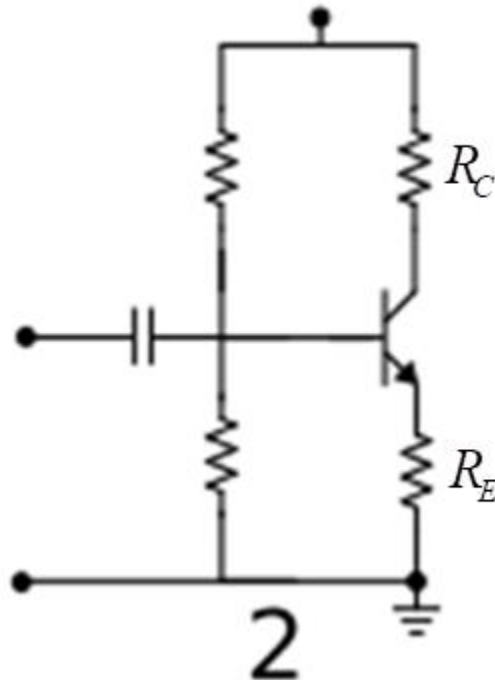
El punto Q depende de la Carga (R_C) y es inestable ante las variaciones del β porque el circuito no posee el resistor R_E .



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

Caso 2

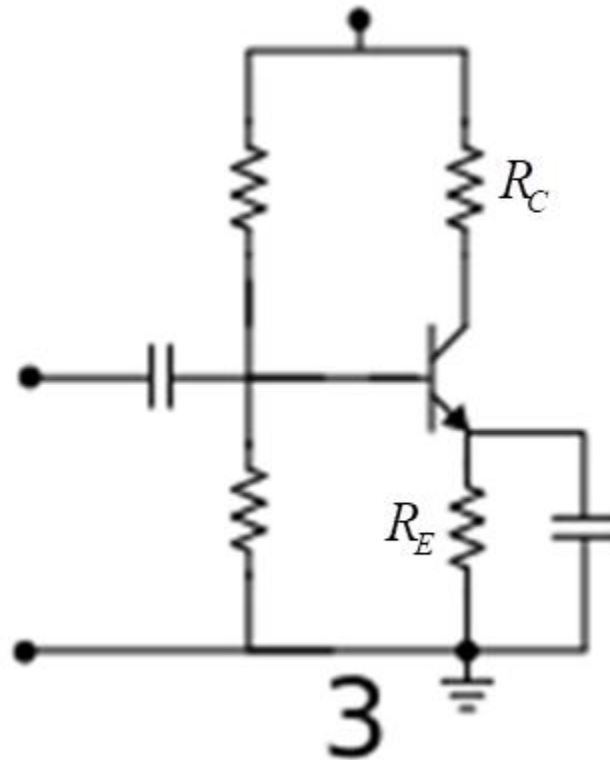
El punto Q depende de la Carga (R_C) y posee pérdidas en corriente alterna en el resistor R_E al no estar desacoplado.



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

Caso 3

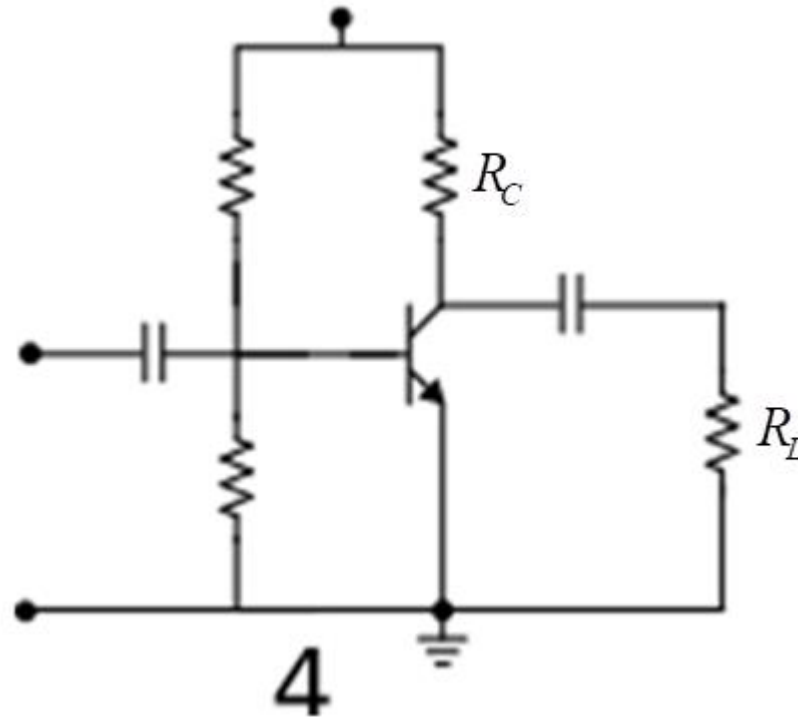
El punto Q depende de la Carga (R_C).



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

Caso 4

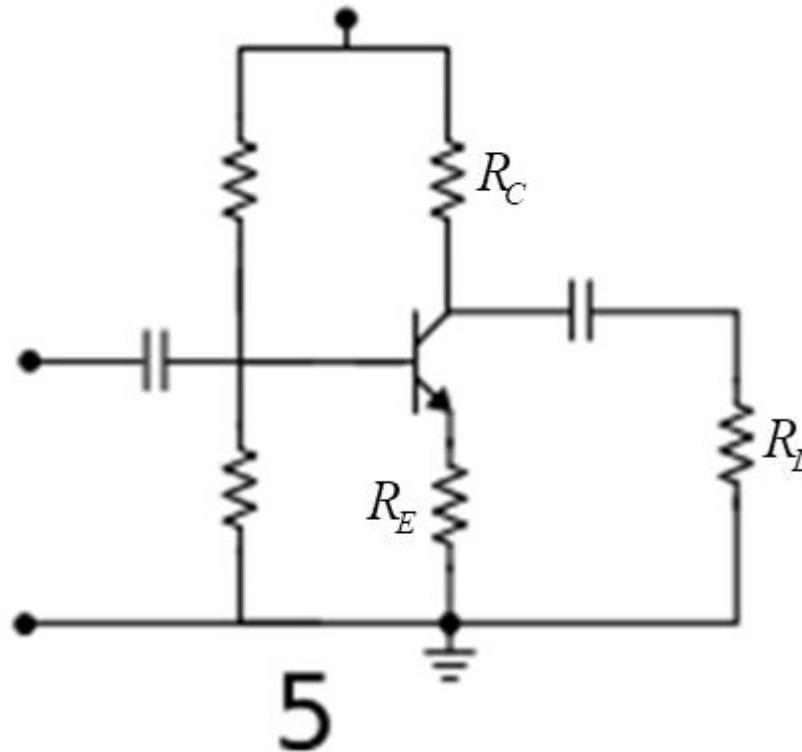
Es inestable ante las variaciones del β porque el circuito no posee el resistor R_E .



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

Caso 5

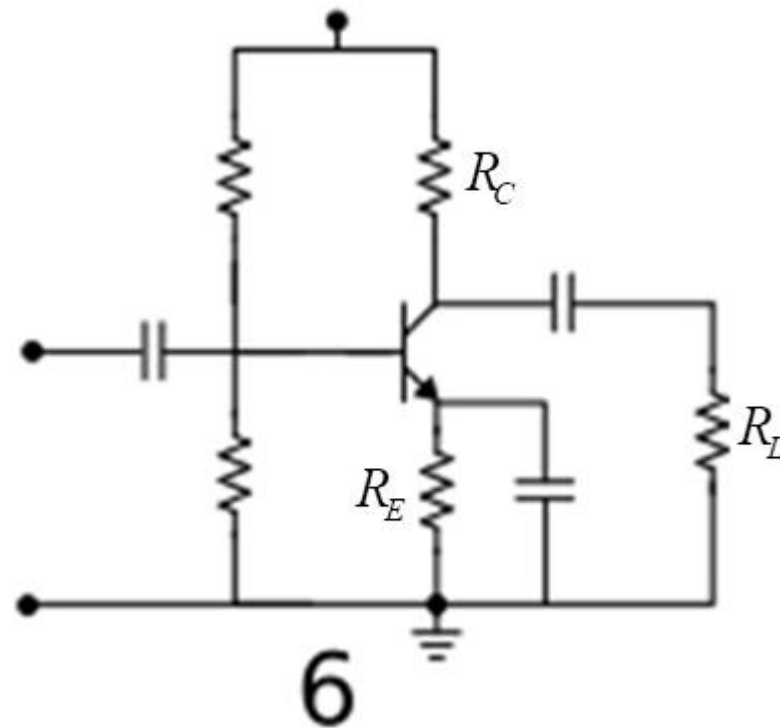
Posee pérdidas en corriente alterna en el resistor R_E al no estar desacoplado.



Seis variantes de circuitos de Emisor Común. Ventajas y desventajas

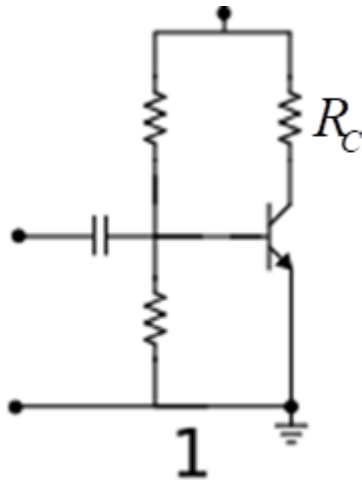
Caso 6

Es la configuración mas óptima.



Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

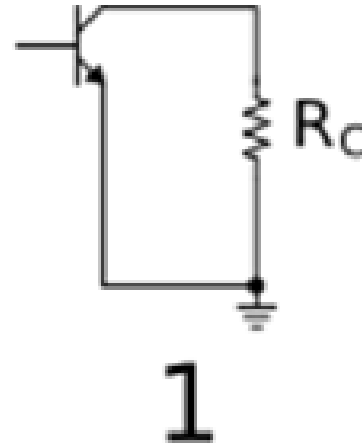
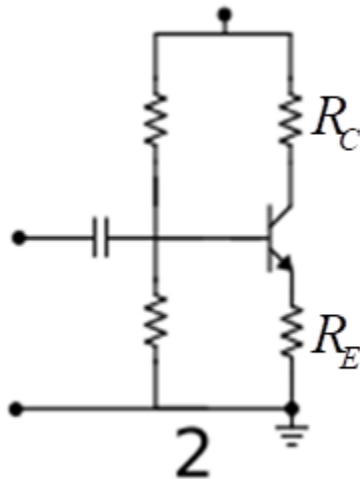


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
1	R_C	R_C	$\frac{V_{CC}}{2R_C}$

Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

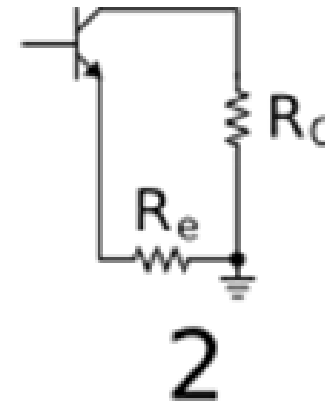
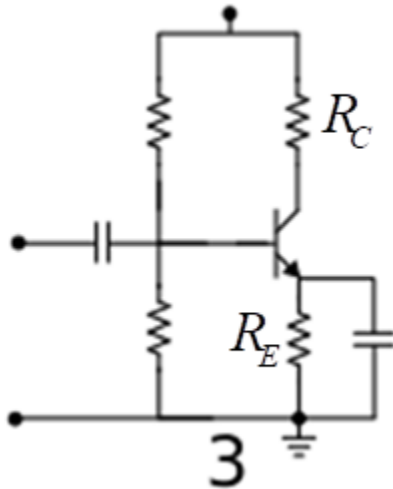


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
2	$R_C + R_E$	$R_C + R_E$	$\frac{V_{CC}}{2(R_C + R_E)}$

Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

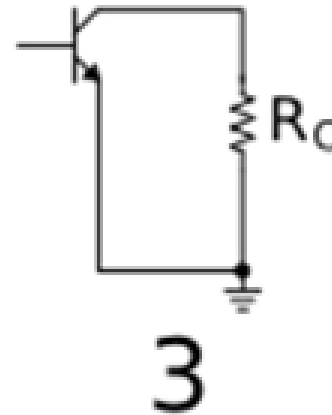
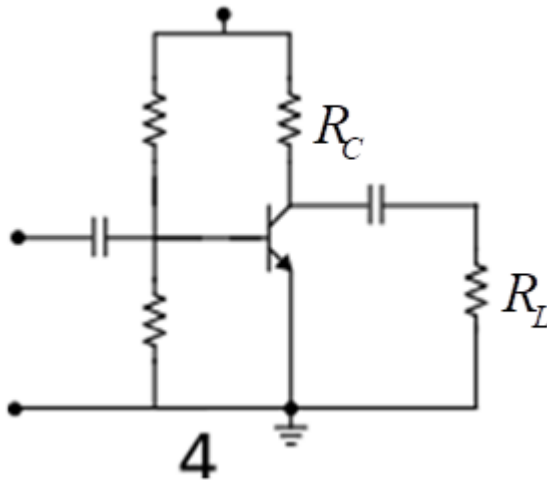


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
3	$R_C + R_e$	R_C	$\frac{V_{CC}}{2R_C + R_e}$

Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

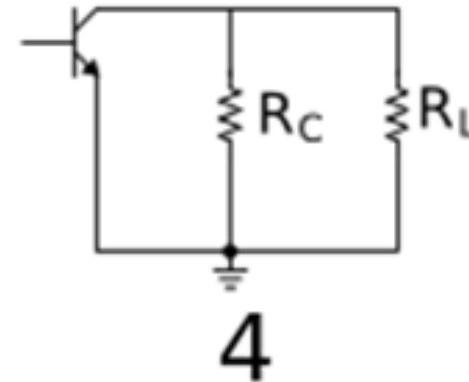
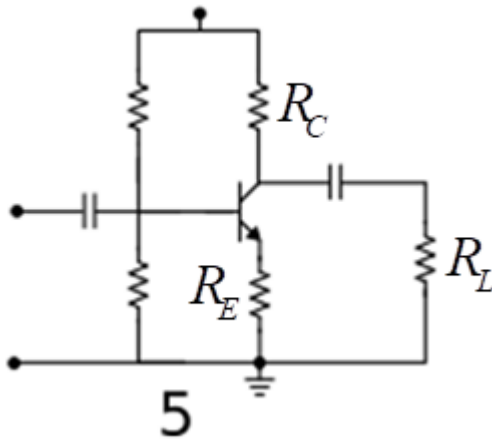


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
4	R_C	$R_C R_L$	$\frac{V_{CC}}{R_C + R_C R_L}$

Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

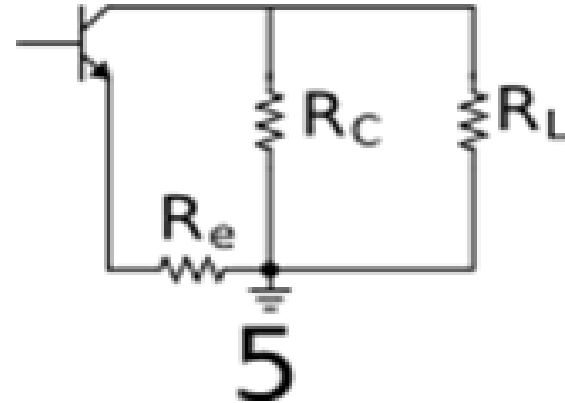
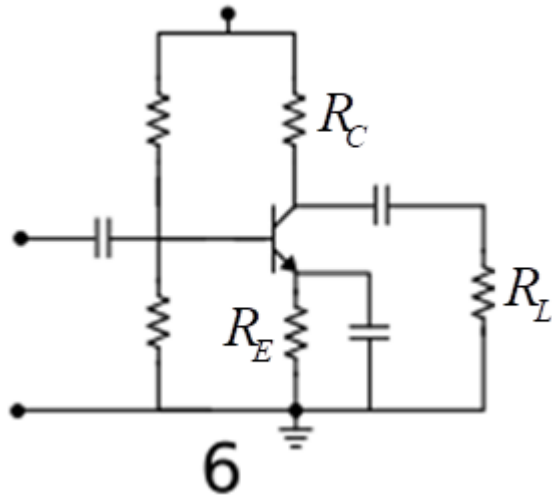


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
5	$R_C + R_E$	$R_E + R_C R_L$	$\frac{V_{CC}}{R_C + 2R_E + R_C R_L}$

Seis variantes de circuitos de Emisor Común.

Circuito



Circuito para corriente alterna

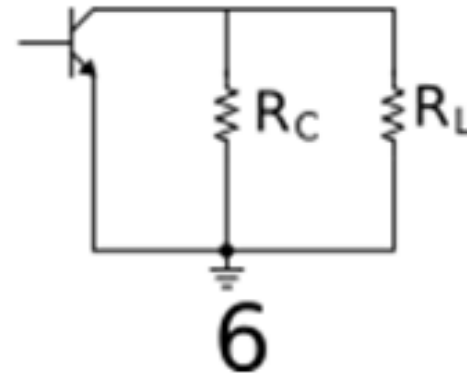
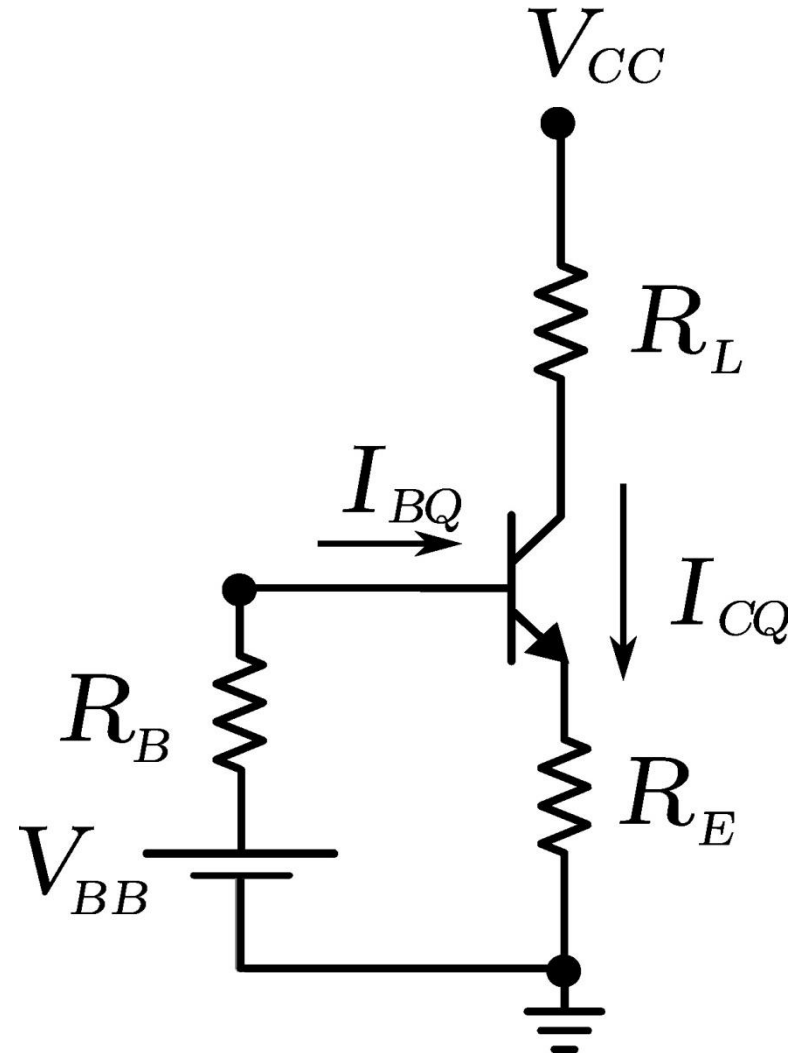


Tabla con resistencia en corriente continua, resistencia en corriente alterna y la corriente para máxima excursión simétrica.

	R_{CC}	R_{CA}	I_{CQMES}
6	$R_C + R_e$	$R_C R_L$	$\frac{V_{CC}}{R_C + R_e + R_C R_L}$

Análisis de Potencia



Potencia media suministrada por un dispositivo lineal o no lineal.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) I(t) dt$$

$$V(t) = V_{AV} + v(t)$$

AV : Average (Promedio)

$$I(t) = I_{AV} + i(t)$$

Suponemos: $v(t)$ y $i(t)$ periodicas y simetricas

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{AV} + v(t)][I_{AV} + i(t)] dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AV} I_{AV} dt + \overbrace{\frac{1}{T} \int_0^T V_{AV} i(t) dt}^{=0} + \overbrace{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) I_{AV} dt}^{=0} + \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AV} I_{AV} dt + \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$

$$\boxed{P = V_{AV} I_{AV} + \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt}$$

Potencia media suministrada por la fuente de Alimentación Pcc.

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} i_C dt \quad \text{donde} \quad \begin{cases} i_C = I_{CQ} + i_c \\ i_c = \hat{i}_c \cos \omega t \end{cases}$$

Entonces :

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} (I_{CQ} + \hat{i}_c \cos \omega t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{CC} I_{CQ} + V_{CC} \hat{i}_c \cos \omega t) dt$$

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} I_{CQ} dt + \overbrace{\frac{1}{T} \int_0^T (V_{CC} \hat{i}_c \cos \omega t) dt}^0 = V_{CC} I_{CQ} \Rightarrow I_{CQ} = \frac{P_{CC}}{V_{CC}} \quad (1)$$

Se tiene para MES

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2(R_L + R_E)} \quad (2)$$

igualando (1) y (2) y despejando

$$\frac{P_{CC}}{V_{CC}} = \frac{V_{CC}}{2(R_L + R_E)} \Rightarrow P_{CC} = \frac{V_{CC}^2}{2(R_L + R_E)}$$

$$\text{Si } R_E \ll R_L \Rightarrow \boxed{P_{CC} \cong \frac{V_{CC}^2}{2R_L}}$$

Potencia media disipada en la carga en C.A.

$$P_{L(CA)} = \frac{1}{T} \int_0^T i_c^2 R_L dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\hat{i}_c^2 \cos^2 \omega t) R_L dt$$

$$P_{L(CA)} = \frac{\hat{i}_c^2 R_L}{T} \int_0^T (\cos^2 \omega t) dt \quad \text{Como, } \cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} = \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{2}$$

$$P_{L(CA)} = \frac{\hat{i}_c^2 R_L}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) dt = \frac{\hat{i}_c^2 R_L}{2T} \int_0^T dt + \frac{\hat{i}_c^2 R_L}{2T} \overbrace{\int_0^T (\cos 2\omega t) dt}^{=0}$$

$$P_{L(CA)} = \frac{1}{2} \hat{i}_c^2 R_L$$

Para MES y $R_E \ll R_L$

$$I_{CQ} = \frac{V_{CC}}{2R_L} = \hat{i}_{c,\max}$$

Entonces

$$P_{L(MAX)} = \frac{1}{2} I_{CQ}^2 R_L = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{4R_L^2} R_L = \frac{1}{8} \frac{V_{CC}^2}{R_L} \Rightarrow \boxed{P_{L(MAX)} = \frac{V_{CC}^2}{8R_L}}$$

Potencia media disipada en el colector.

$$\begin{aligned}P_C &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{CE} i_C dt \quad \begin{cases} v_{CE} = V_{CC} - i_C (R_L + R_E) \\ i_C = I_{CQ} + i_c = I_{CQ} + \hat{i}_c \cos \omega t \end{cases} \\&= \frac{1}{T} \int_0^T [V_{CC} - i_C (R_L + R_E)] i_C dt \\&= \frac{1}{T} \int_0^T [V_{CC} i_C - i_C^2 (R_L + R_E)] dt \\P_C &= \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} i_C dt}_{P_{CC}} - (R_L + R_E) \underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T i_C^2 dt}_{P_L + P_E}\end{aligned}$$

Potencia media disipada en el colector.

Tambien

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_c^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (I_{CQ} + \hat{i}_c \cos \omega t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(I_{CQ}^2 + 2 \times I_{CQ} \times \hat{i}_c \cos \omega t + \hat{i}_c^2 \underbrace{\cos^2 \omega t}_{\frac{1}{2} + \frac{\cos 2\omega t}{2}} \right) dt = I_{CQ}^2 + \frac{\hat{i}_c^2}{2}$$

Luego

$$P_C = P_{CC} - (R_L + R_E) \left(I_{CQ}^2 + \frac{\hat{i}_c^2}{2} \right) = P_{CC} - (R_L + R_E) I_{CQ}^2 - (R_L + R_E) \frac{\hat{i}_c^2}{2}$$

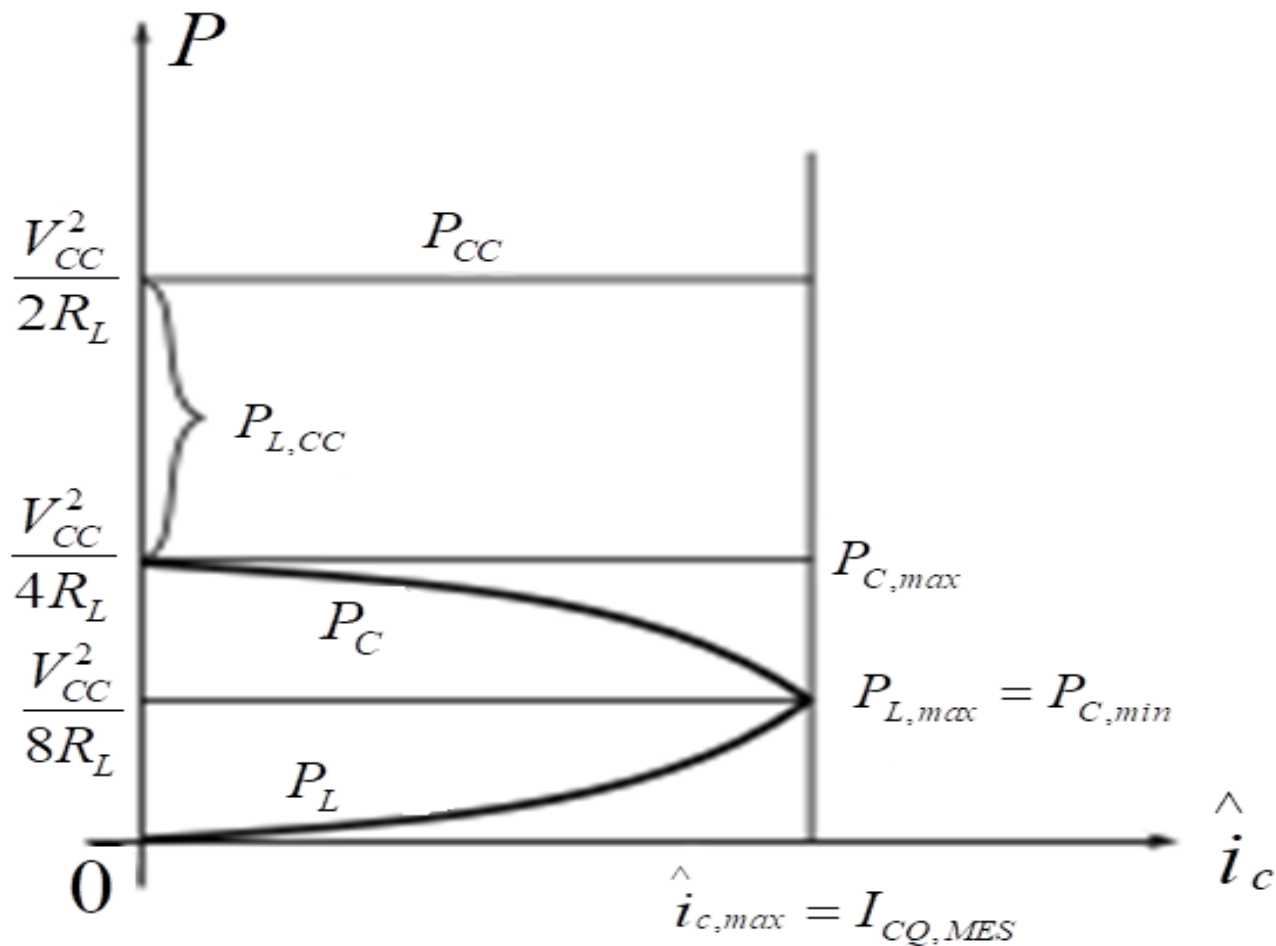
En ausencia de señal ($\hat{i}_c = 0$):

$$P_{C(\max)} = P_{CC} - (R_L + R_E) I_{CQ}^2 = \frac{V_{CC}^2}{2(R_L + R_E)} - (R_L + R_E) \times \frac{V_{CC}^2}{4(R_L + R_E)^2} = \frac{V_{CC}^2}{4(R_L + R_E)} \cong \boxed{\frac{V_{CC}^2}{4R_L}}$$

Con maxima señal:

$$P_{C(\min)} = P_C \Big|_{\hat{i}_c = I_{CQ}} = \frac{V_{CC}^2}{2(R_L + R_E)} - (R_L + R_E) \times \frac{V_{CC}^2}{4(R_L + R_E)^2} - (R_L + R_E) \times \frac{V_{CC}^2}{8(R_L + R_E)^2} \cong \boxed{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}$$

Grafica de potencias en función de la corriente pico de colector.



Rendimiento y Factor de Merito

$$\eta = \frac{P_{L(CA)}}{P_{CC}}$$

$$\eta_{\max} = \frac{P_{L,\max}}{P_{CC}} = \frac{\frac{V_{CC}^2}{8R_L}}{\frac{V_{CC}^2}{2R_L}} = \frac{1}{4} \Rightarrow \eta_{\max} = 25\%$$

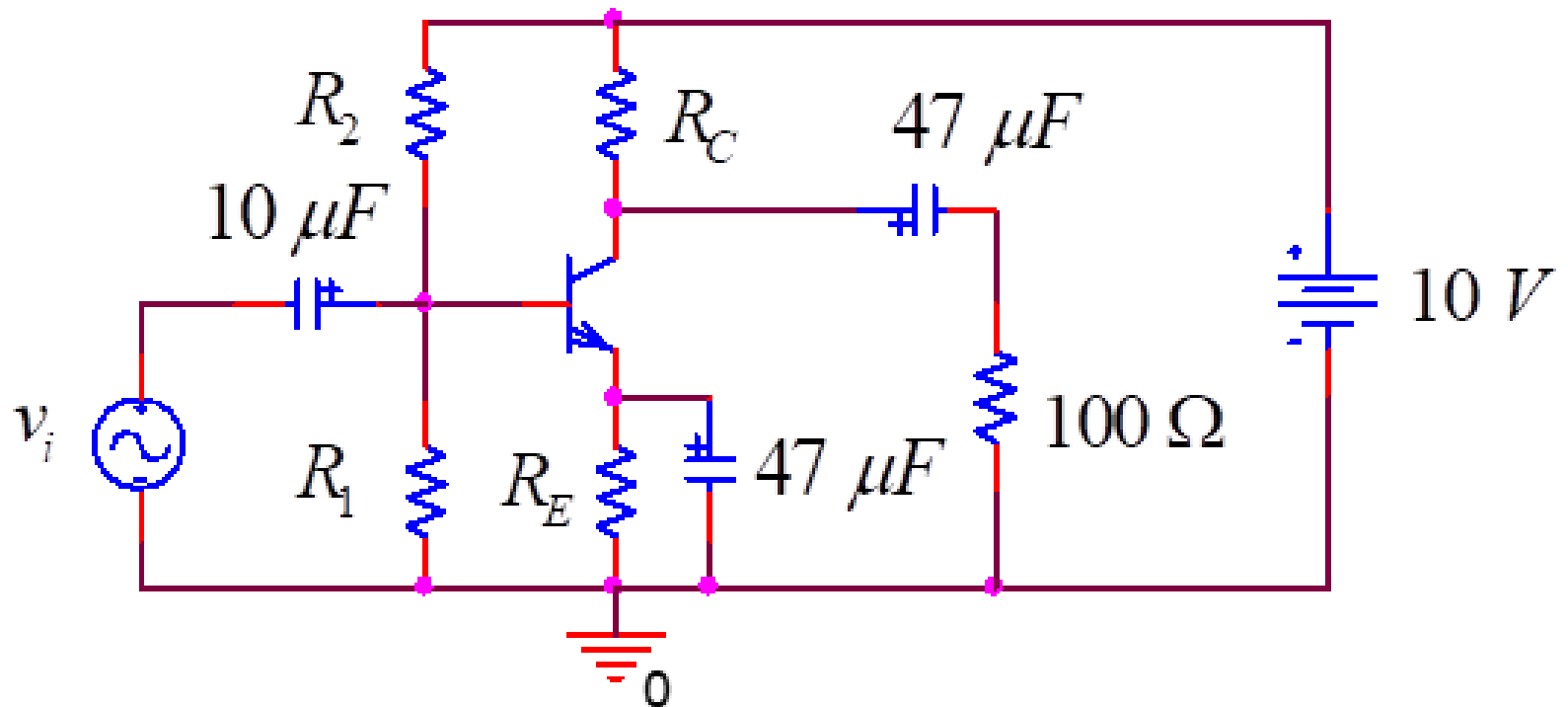
$$FM = \frac{P_{C,\max}}{P_{L,\max}} = \frac{V_{CC}^2/4R_L}{V_{CC}^2/8R_L} = 2$$

El FM es deseable que sea lo mas bajo posible.

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Hallar R_1 , R_2 , R_C y R_E para el circuito de la figura.

Datos : $V_{CEQ} = 5$, $I_{CQ} = 10\text{mA}$, $\beta = 300$



Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Cálculo de R_E (Aplicando criterio de mínima disipación en CC en R_E).

$$\left. \begin{array}{l} V_{R_E} = \frac{1}{10} V_{CC} \\ V_{R_E} = I_{CQ} R_E \end{array} \right\} I_{CQ} R_E = \frac{1}{10} V_{CC} \Rightarrow R_E = \frac{V_{CC}}{10 I_{CQ}} = \frac{10}{10 \times 0.010} = 100 \, \Omega$$

Cálculo de R_C .

$$V_{CC} - V_{CEQ} - I_{CQ} (R_E + R_C) = 0$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - I_{CQ} R_E}{I_{CQ}} = \frac{10 - 5 - 0.01 \times 100}{0.01} = 400 \, \Omega$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Cálculo de R_B (Aplicando criterio de estabilidad).

$$R_B = \frac{\beta R_E}{10} = \frac{300 \times 100}{10} = 3 \text{ K}\Omega$$

Cálculo de V_{BB}

$$V_{BB} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \times R_B + V_{BEQ} + I_{CQ} R_E = \frac{0.01}{300} \times 3000 + 0.7 + 0.01 \times 100 = 1.8 \text{ V}$$

Cálculo de R_1 y R_2

$$R_1 = \frac{R_B}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} = \frac{3000}{1 - \frac{1.8}{10}} = 3.658 \text{ K}\Omega \quad R_2 = \frac{R_B}{\frac{V_{BB}}{V_{CC}}} = \frac{3000}{\frac{1.8}{10}} = 16.667 \text{ K}\Omega$$

Solución Amplificador Emisor Común.

Rectas de carga de CC y CA.

Recta CC.

$$v_{CE} = V_{CC} - i_C (R_E + R_C)$$

$$v_{CE} = 10 - i_C \times 500$$

Trazado

$$i_C = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{CE,\max} = 10 \text{ V}$$

$$v_{CE} = 0 \quad \Rightarrow \quad i_{C,\max} = \frac{10}{500} = 0.02 = 20 \text{ mA}$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Recta CA.

$$v_{CE} = V'_{CC} - i_C (R_C // R_L)$$

$$v_{CE} = V'_{CC} - i_C \times 80$$

En el punto Q tenemos

$$V_{CEQ} = V'_{CC} - I_{CQ} \times 80 \Rightarrow V'_{CC} = V_{CEQ} + I_{CQ} \times 80$$

$$V'_{CC} = 5 + 0.010 \times 80 = 5.8 \text{ V}$$

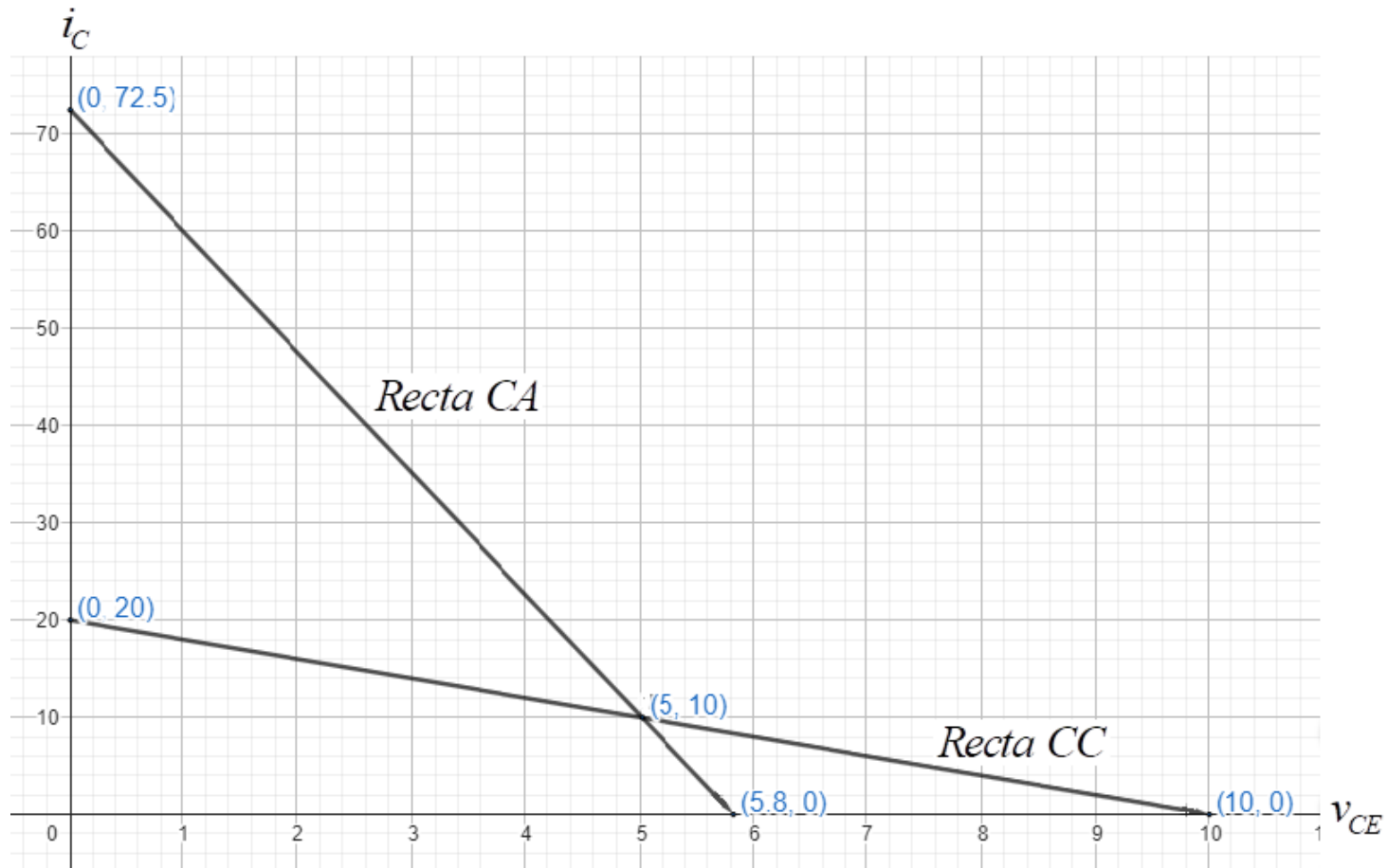
$$v_{CE} = 5.8 - i_C \times 80$$

$$i_C = 0 \Rightarrow v_{CE, \max} = 5.8 \text{ V}$$

$$v_{CE} = 0 \Rightarrow i_{C, \max} = \frac{5.8}{80} = 0.0725 = 72.5 \text{ mA}$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Gráfica de las Rectas de carga de CC y CA.(Geogebra)



Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Rediseño para máxima excursión simétrica.

Cálculo de $I_{CQ,MES}$ y $V_{CEQ,MES}$.

$$I_{CQ,MES} = \frac{V_{CC}}{\underbrace{(R_E + R_C)}_{R_{CC}} + \underbrace{R_C // R_L}_{R_{CA}}} = \frac{10}{(100 + 400) + 400 // 100} = 17.24 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ,MES} = V_{CC} - I_{CQ,MES}(R_E + R_C) = 10 - 0.01724 \times 500 = 1.38 \text{ V}$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Cálculo de R_B (Aplicando criterio de estabilidad).

$$R_B = \frac{\beta R_E}{10} = \frac{300 \times 100}{10} = 3 \text{ K}\Omega \quad (\text{queda el mismo valor})$$

Cálculo de V_{BB}

$$V_{BB} = \frac{I_{CQ,MES}}{\beta} \times R_B + V_{BEQ} + I_{CQ,MES} R_E = \frac{0.01724}{300} \times 3000 + 0.7 + 0.01724 \times 100 = 2.5964 \text{ V}$$

Cálculo de R_1 y R_2

$$R_1 = \frac{R_B}{1 - \frac{V_{BB}}{V_{CC}}} = \frac{3000}{1 - \frac{2.5964}{10}} = 4.052 \text{ K}\Omega \quad R_2 = \frac{R_B}{\frac{V_{BB}}{V_{CC}} - 1} = \frac{3000}{\frac{2.5964}{10} - 1} = 11.554 \text{ K}\Omega$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Recta CA.

$$v_{CE} = V_{CC}' - i_C (R_C // R_L)$$

$$v_{CE} = V_{CC}' - i_C \times 80$$

En el punto Q tenemos

$$V_{CEQ} = V_{CC}' - I_{CQ,MES} \times 80 \Rightarrow V_{CC}' = V_{CEQ} + I_{CQ,MES} \times 80 = 1.38 + 0.01724 \times 80 = 2.76 \text{ V}$$

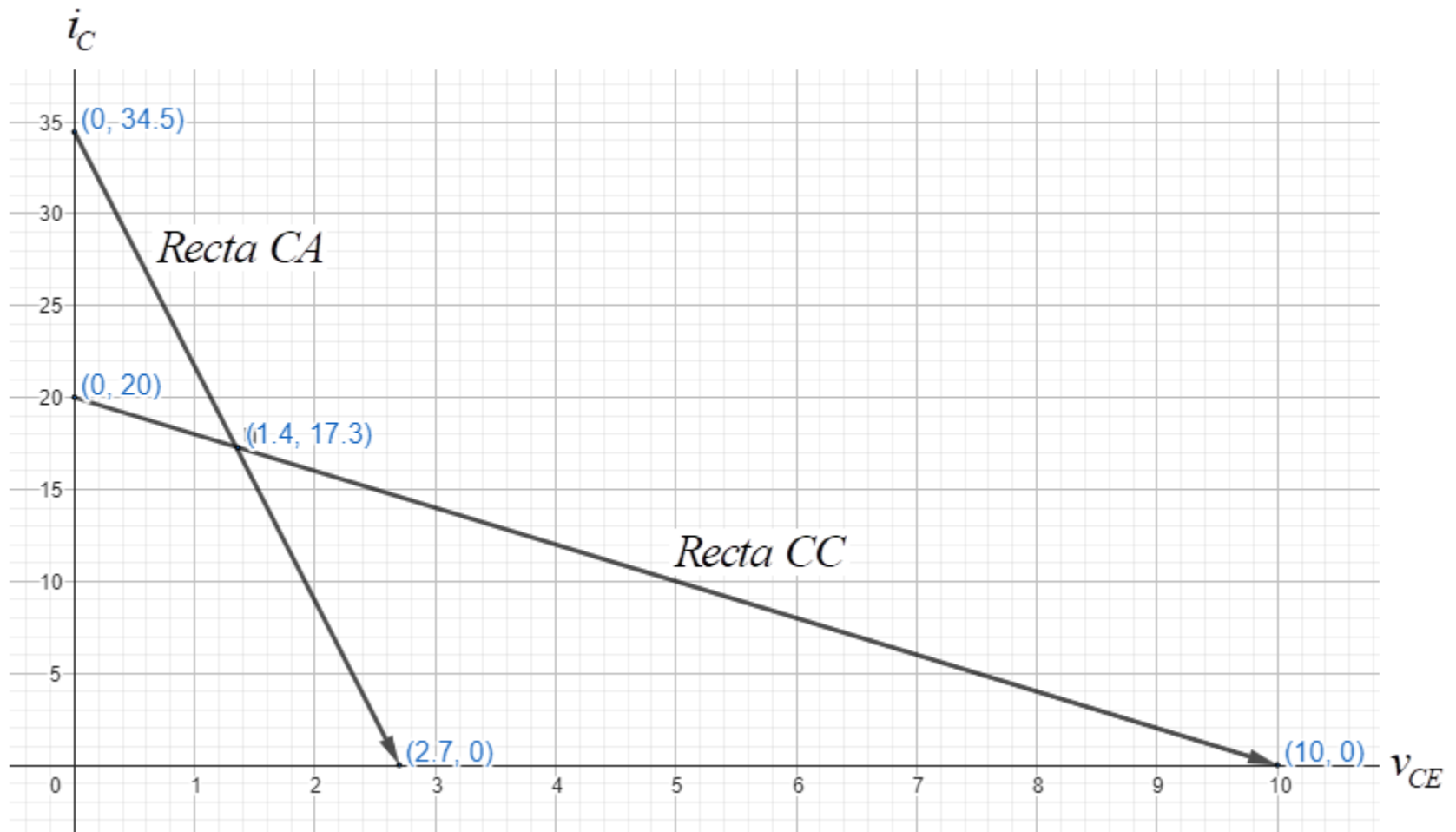
$$v_{CE} = 2.76 - i_C \times 80$$

$$i_C = 0 \Rightarrow v_{CE,\max} = 2.76 \text{ V}$$

$$v_{CE} = 0 \Rightarrow i_{C,\max} = \frac{2.76}{80} = 0.0345 = 34.5 \text{ mA}$$

Ejemplo de diseño Amplificador Emisor Común.

Gráfica de las Rectas de Carga CC y CA para MES.

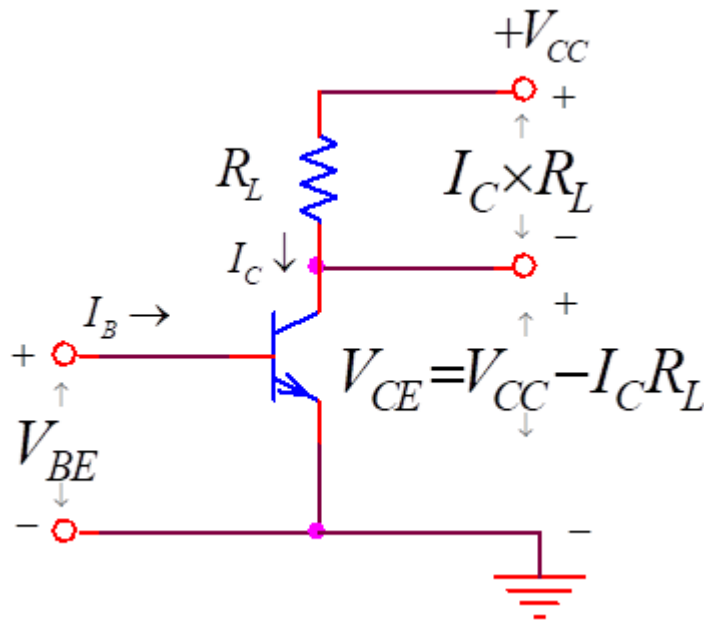


El Transistor en conmutación.

Conmutador con transistor ideal.

La salida es entre colector y emisor.

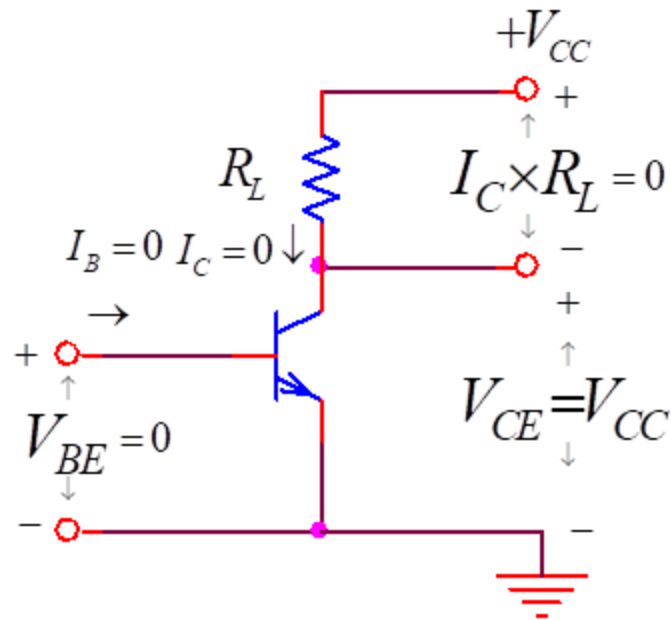
La entrada o de control es entre base y emisor.



El Transistor en conmutación.

Conmutador con transistor ideal en corte.

Cuando $V_{BE} = 0$ la corriente de base $I_B = 0$ y $I_C = 0$.



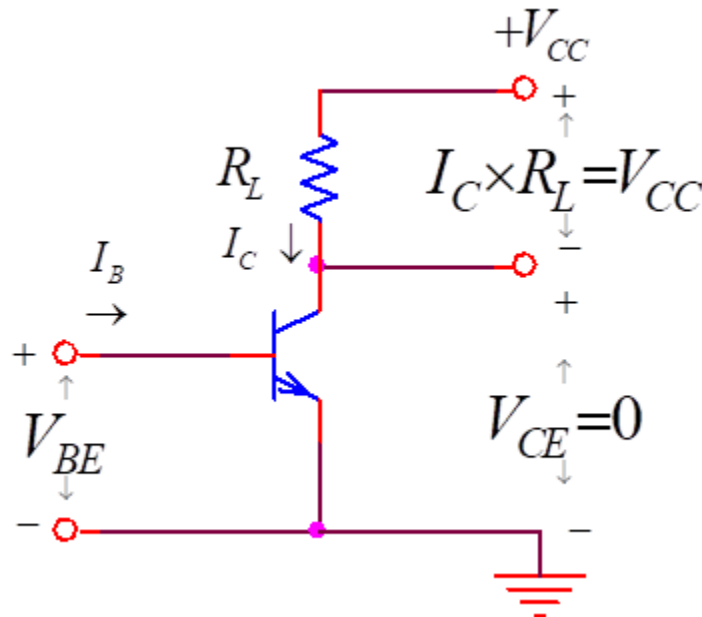
El Transistor en conmutación.

Conmutador con transistor ideal en saturación.

Cuando V_{BE} es + circula corriente por I_B e $I_C = \beta I_B$.

Si I_B tiene suficiente valor, $I_C \times R_L$ puede llegar a ser igual V_{CC} .

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_L = V_{CC} - V_{CC} = 0$$



El Transistor en conmutación.

Potencia disipada en el conmutador con transistor ideal.

$$P_D = I_C \times V_{CE}$$

Cuando no conduce

$$I_C = 0 \quad \Rightarrow \quad P_D = 0 \times V_{CE} = 0$$

Cuando conduce

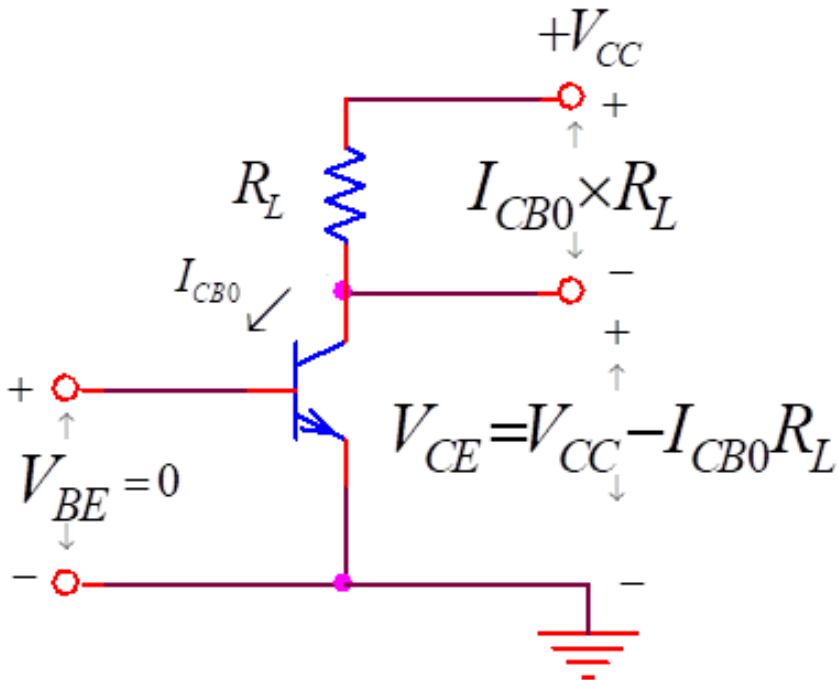
$$V_{CE} = 0 \quad \Rightarrow \quad P_D = I_C \times 0 = 0$$

*Nota : Solo se disipa potencia en la
transición ya sea cuando asciende
o desciende.*

El Transistor en conmutación.

Conmutador con transistor real en corte.

Cuando $V_{BE} = 0$ la corriente de base $I_B = 0$ e $I_C = I_{CB0}$.



$$V_{CE} = V_{CC} - I_{CB0} R_L$$

Por ej si $V_{CC} = 10 \text{ V}$ $R_L = 1 \text{ K}\Omega$

$$I_{CB0} = 1 \mu\text{A}$$

$$V_{CE} = 10 - 1 \times 10^{-6} \times 1000$$

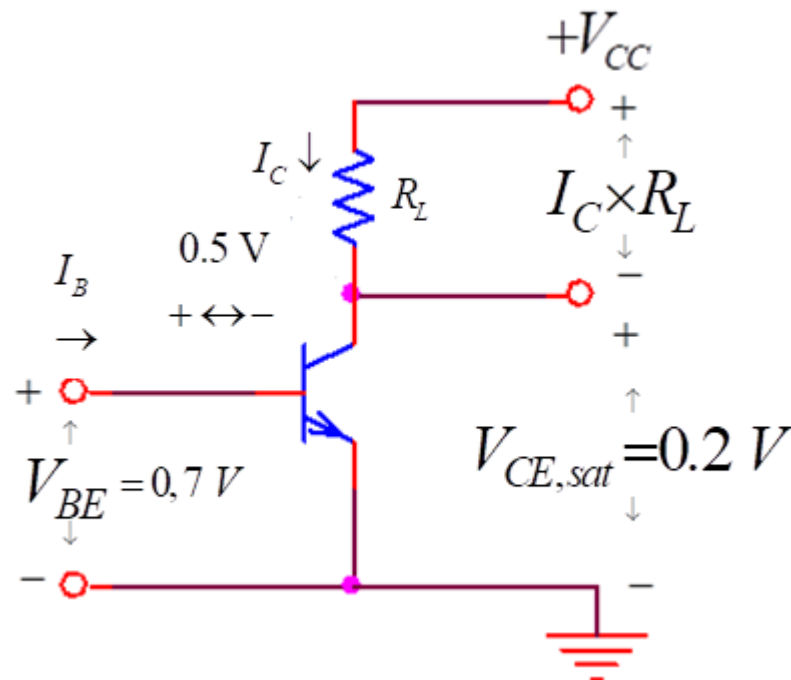
$$V_{CE} = 9.999 \text{ V} \cong 10 \text{ V}$$

El Transistor en conmutación.

Conmutador con transistor real en saturación.

Cuando el transistor esta saturado existe una tensión de saturación colector emisor de aproximadamente 0.2 V.

La juntura colector base que normalmente esta en polarización inversa en este caso lo esta en directa.

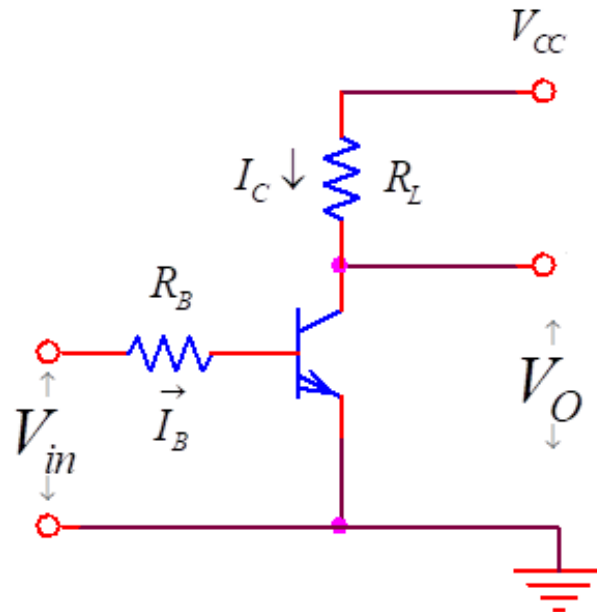


El Transistor en conmutación.

Ejemplo

Proyectar un circuito inversor.

Datos: $V_{CC} = 12\text{ V}$, $V_{in} = \begin{cases} 3.3\text{ V} \\ 0\text{ V} \end{cases}$, $V_o = \begin{cases} 0\text{ V} \\ 12\text{ V} \end{cases}$, $I_C = 10\text{ mA}$



El Transistor en conmutación.

Cálculo de R_L .

$$V_{CC} = I_C \times R_L + V_{CE,sat} \quad \Rightarrow \quad R_L = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{I_C} = \frac{12 - 0.2}{0.010} = 1180 \, \Omega$$

Siempre se debe seleccionar el valor normalizado mas grande para asegurar la saturación ($I_C R_L$), en este caso $1.2 \, K\Omega$.

Cálculo de I_B .

$$I_{B,min} = \frac{I_C}{\beta_{min}} = \frac{0.010}{75} = 0.133 \, mA$$

El Transistor en conmutación.

Cálculo de R_B .

$$V_{in} = I_{B,min} R_B + V_{BE} \quad \Rightarrow \quad R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_{B,min}} = \frac{3.3 - 0.7}{0.133 \times 10^{-3}} = 19.5 \text{ K}\Omega$$

Se debe seleccionar el valor normalizado por debajo ($18\text{K}\Omega$) de manera que genere una I_B mayor para asegurar la saturación.

Bibliografía

- **Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados,**
Donald L. Schilling-Charles Belove.
- **Dispositivos Electrónicos,**
Thomas L. Floyd.
- **Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos,**
Robert L. Boylestad-Louis Nashelsky.
- **1100 Problemas de Electrónica Resueltos.**
Ing Alberto Muhana
- **Circuitos de Pulsos – Estado Solido,**
David A Bell