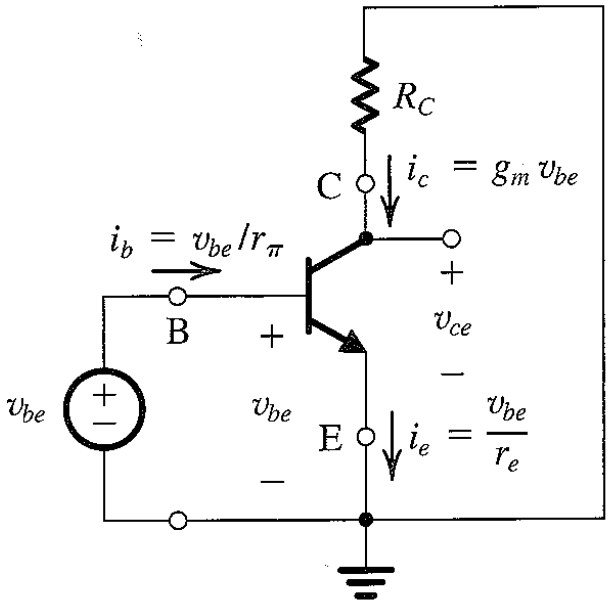
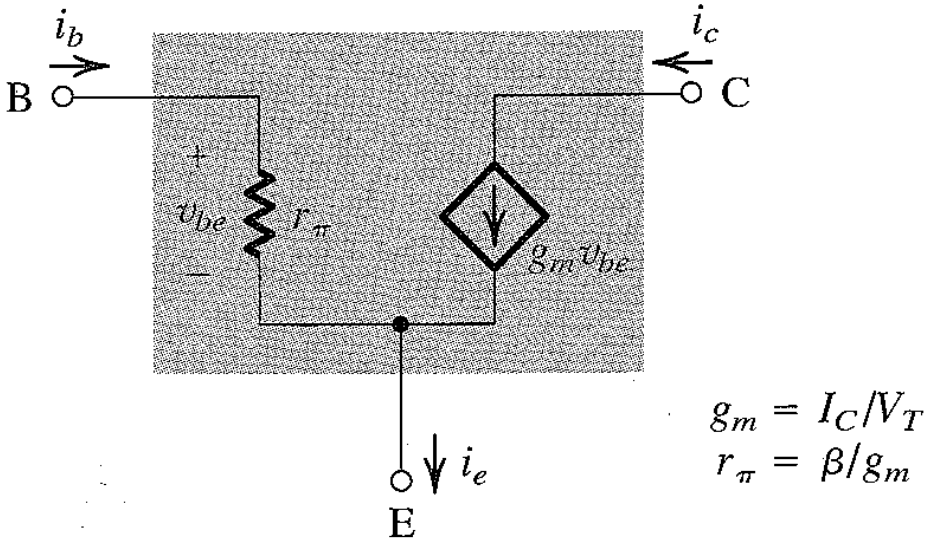
MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL: EL MODELO HÍBRIDO π

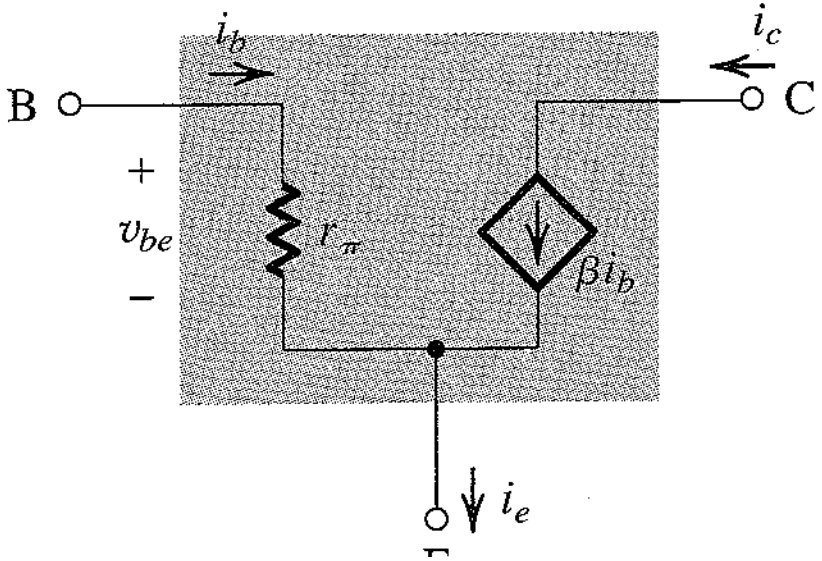
Se eliminan las fuentes DC





$$g_m = I_C/V_T$$
$$r_\pi = \beta/g_m$$

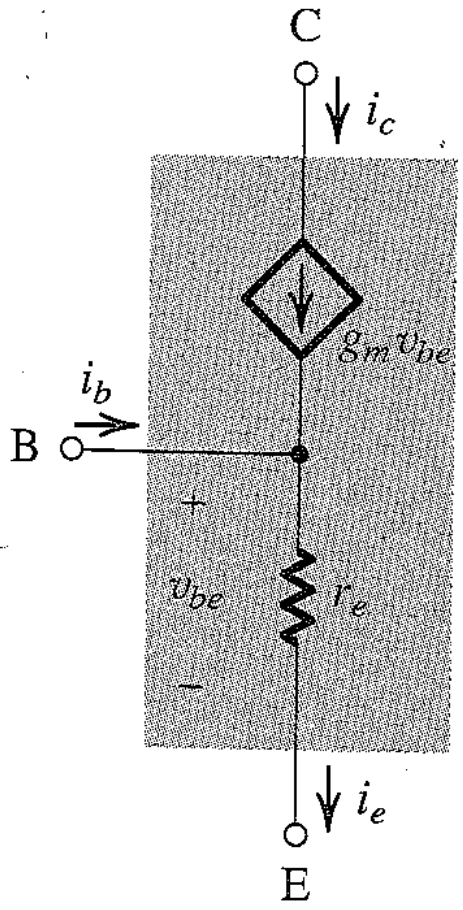
El modelo también aplica para transistores pnp sin cambio de polaridades



MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL: EL MODELO T

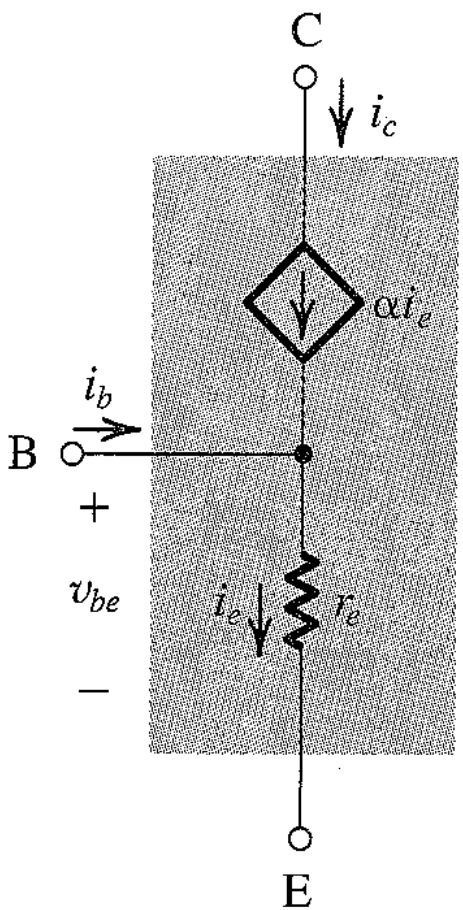
Se eliminan las fuentes DC

Este modelo muestra explícitamente la resistencia de emisor r_e en lugar de la resistencia de base r_π



$$g_m = I_C/V_T$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$$



APLICACIÓN DE LOS MODELOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL

1.- Determinar el punto de operación del BJT considerando solo las fuentes DC.

2.- Calcular los valores de los parámetros de pequeña señal: g_m, r_π, r_e

3.- Elimine las fuentes DC sustituyendo las fuentes de voltaje por un cortocircuito y las fuentes de corriente por un circuito abierto.

4.- Reemplace el BJT por uno de sus modelos de pequeña señal.

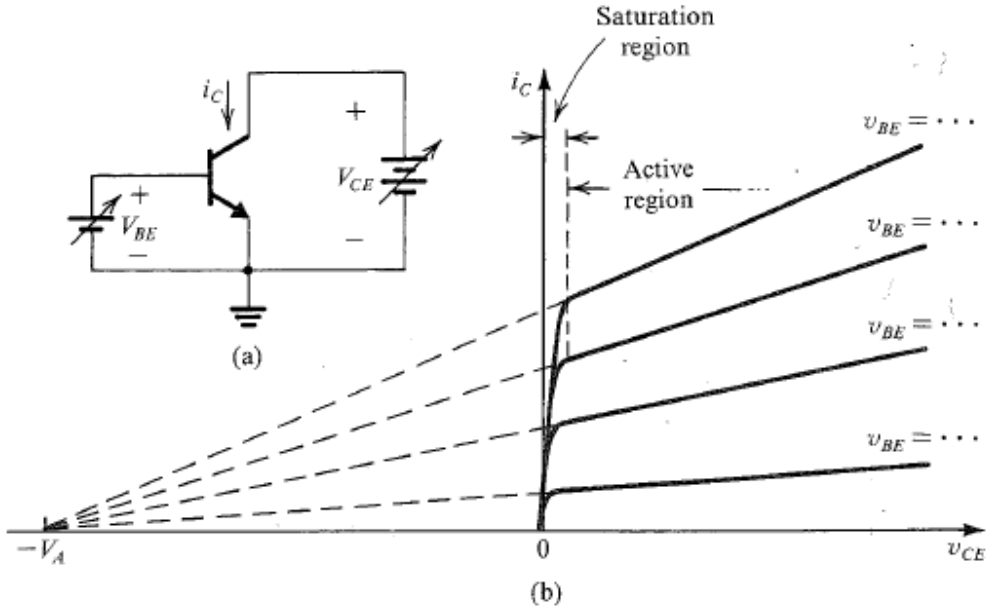
5.- Resuelva el circuito para obtener las variables deseadas.

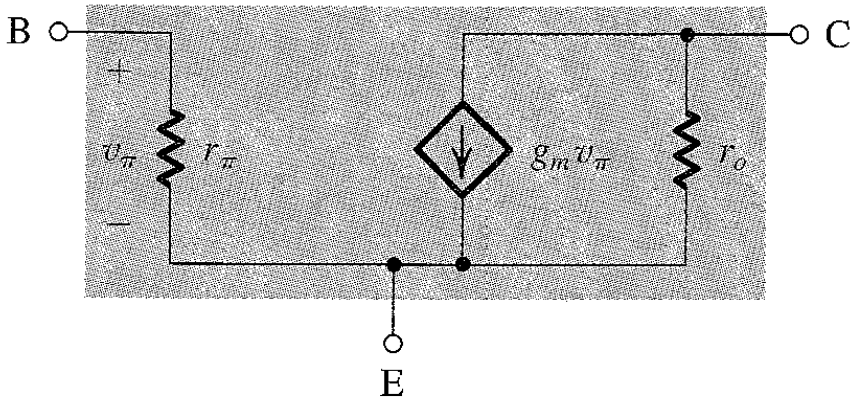
EL EFECTO EARLY EN LOS MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL

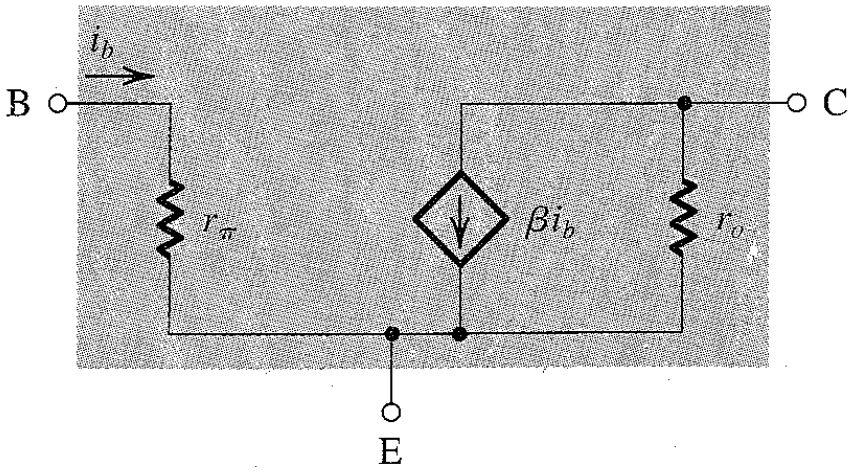
La corriente de colector I_C también depende de v_{CE}

La relación entre I_C y v_{CE} es una resistencia cuyo valor es $(V_A+V_{CE})/IC \approx V_A/I_C$

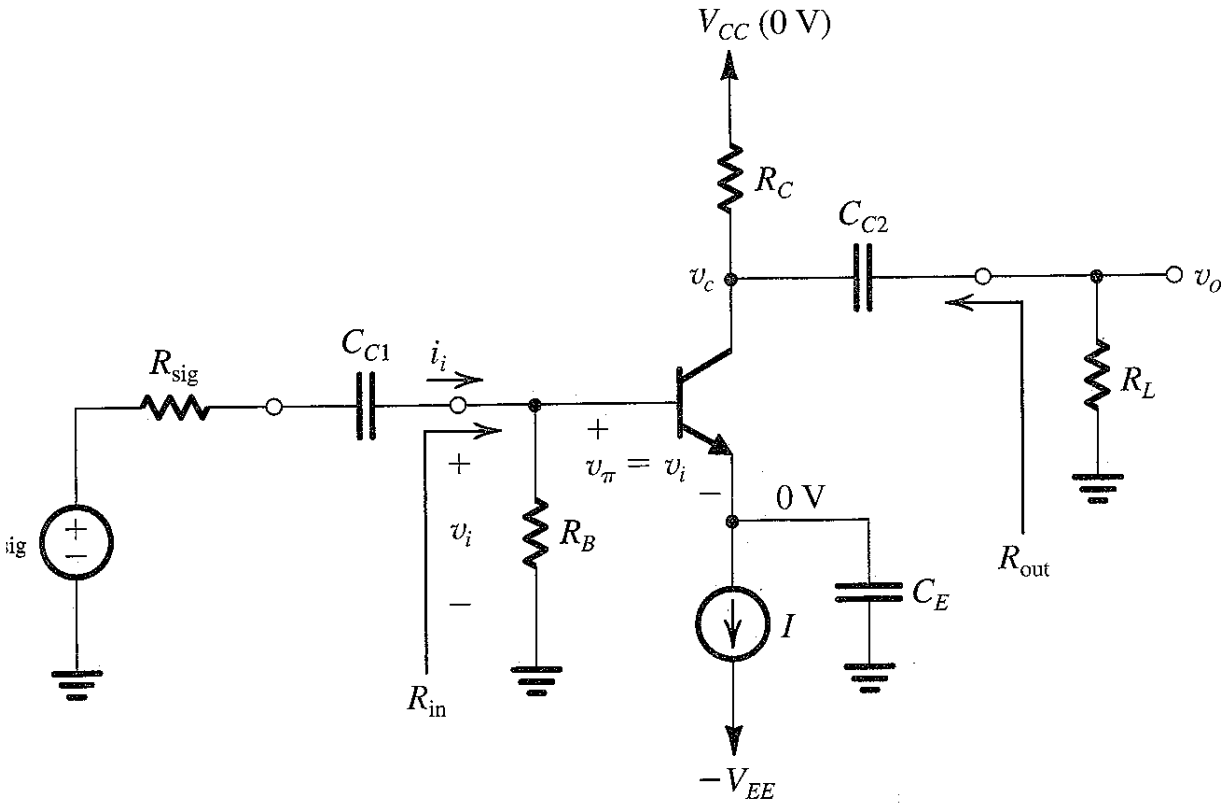
Esta resistencia se coloca en los modelos entre C y E





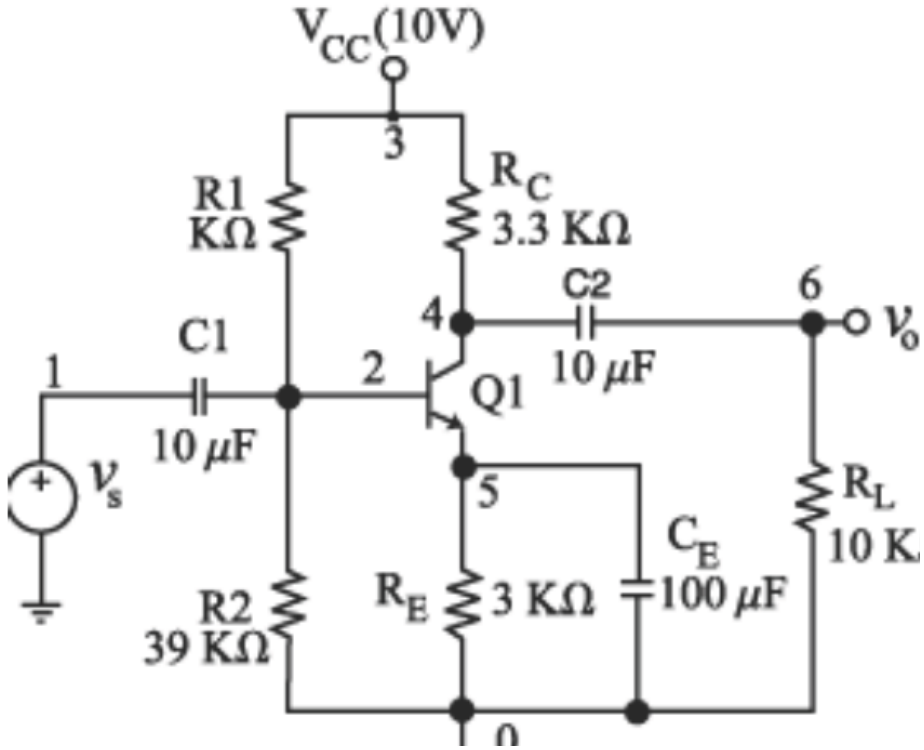


CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

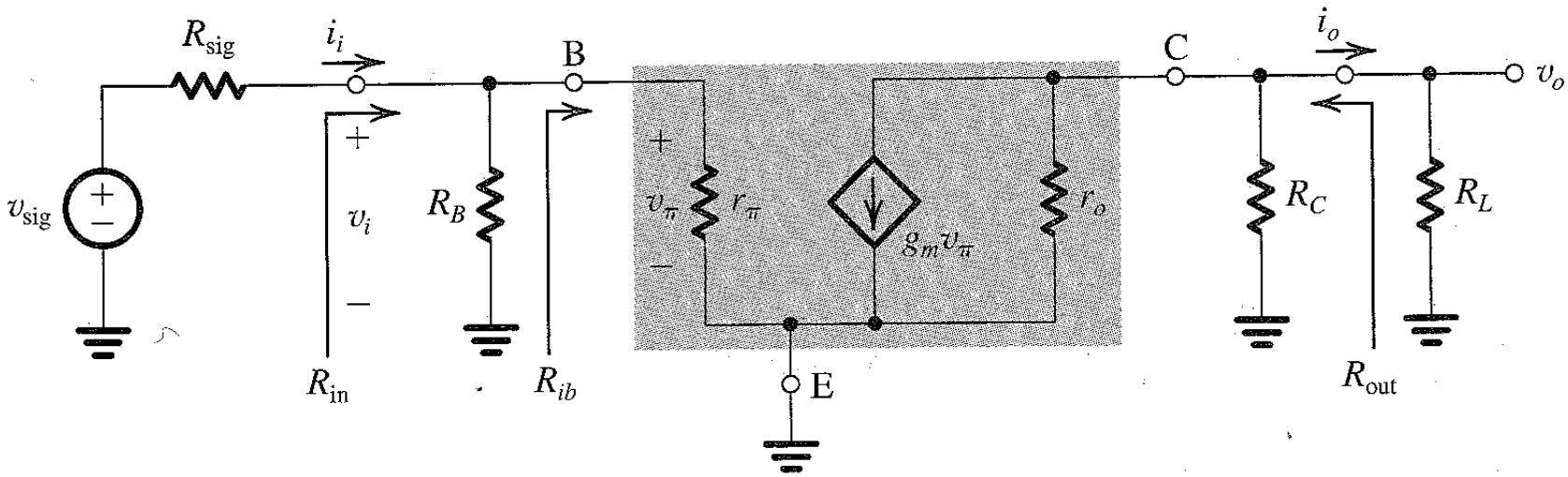


¿Para qué son los condensadores?

Para acoplamiento de las señales AC



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN



Resistencia de entrada

$$R_{\text{in}} \equiv \frac{v_i}{i_i} = R_B \parallel R_{ib} \qquad R_{ib} = r_\pi \qquad R_{\text{in}} \cong r_\pi$$

Voltaje de entrada al amplificador

$$v_\pi = v_i$$

$$v_i = v_{\text{sig}} \frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{in}} + R_{\text{sig}}} = v_{\text{sig}} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B + r_\pi) + R_{\text{sig}}} \cong v_{\text{sig}} \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{\text{sig}}}$$

En la salida $v_o = -g_m v_\pi (r_o \| R_C \| R_L)$

Si $v_i = v_\pi$ $A_v = -g_m (r_o \| R_C \| R_L)$

Si la carga no está conectada $A_{vo} = -g_m (r_o \| R_C)$

Resistencia de salida $R_{\text{out}} = R_C \| r_o$

La ganancia cuando se conecta una R_L específica $A_v = A_{vo} \dfrac{R_L}{R_L + R_o}$

La ganancia total de la fuente a la carga

$$G_v = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{\text{sig}}} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$

Si R_B mucho mayor que r_π $$G_v \cong -\frac{\beta(R_C \parallel R_L \parallel r_o)}{r_\pi + R_{\text{sig}}}$$

Si R_{sig} mucho menor que r_π $$G_v \cong -g_m(R_C \parallel R_L \parallel r_o)$$

Ganancia de corriente en cortocircuito (se reduce a) $$i_{os} = -g_m v_\pi \quad v_\pi = v_i = i_i R_{\text{in}}$$

$$A_{is} \equiv \frac{i_{os}}{i_i} = -g_m R_{\text{in}} \qquad R_{\text{in}} = R_B \parallel r_\pi$$

$$R_B \gg r_\pi \qquad A_{is} \equiv -\beta,$$

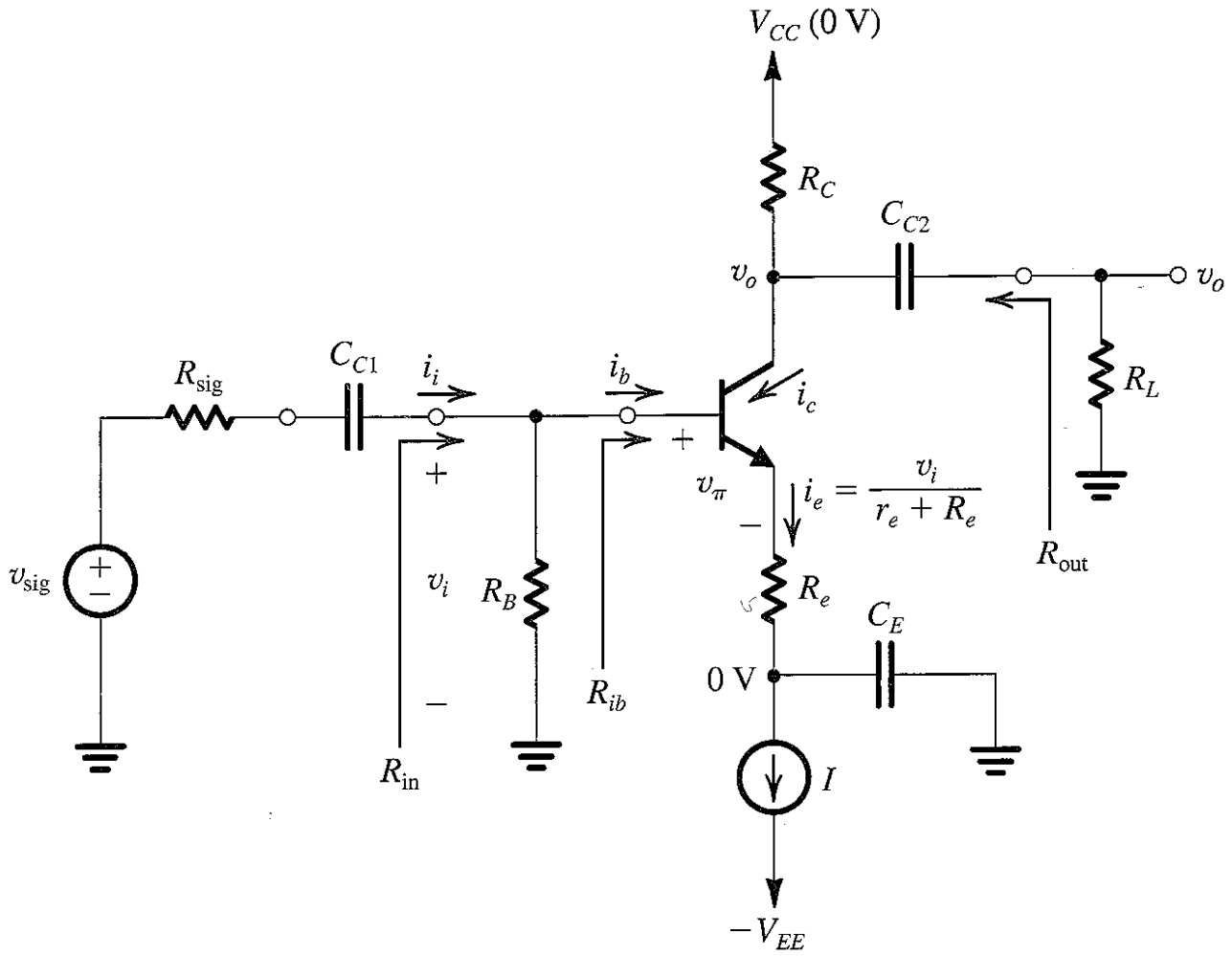
CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

El emisor común tiene altas ganancias de voltaje A_v y de corriente en cortocircuito A_{is}

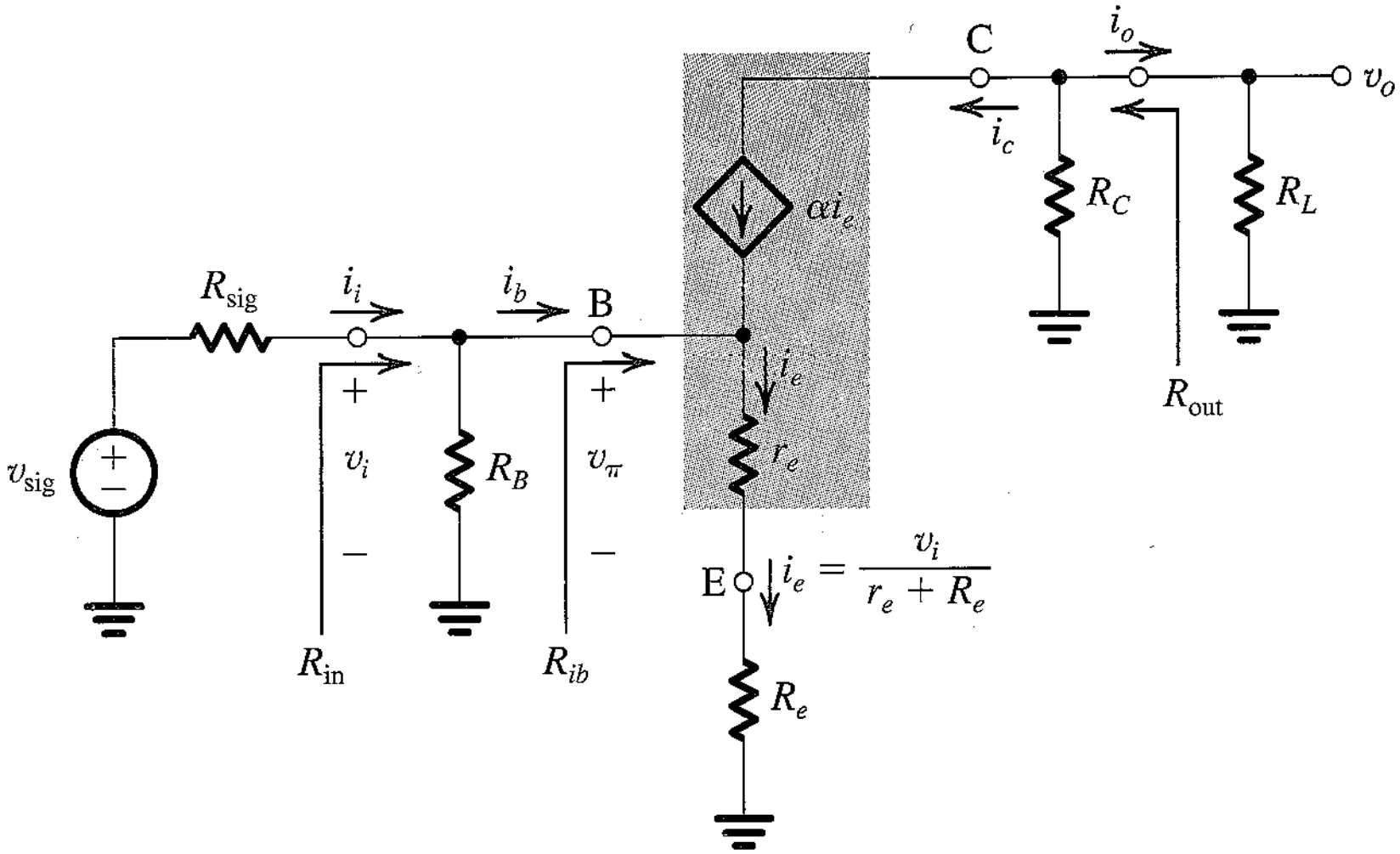
pero la resistencia de entrada R_{in} es baja

y la resistencia de salida R_{out} es relativamente alta

CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN



Resistencia de entrada $R_{\text{in}} = R_B \parallel R_{ib}$

$$R_{ib} \equiv \frac{v_i}{i_b} \qquad i_b = (1-\alpha)i_e = \frac{i_e}{\beta+1} \qquad i_e = \frac{v_i}{r_e + R_e}$$

La resistencia de entrada es mucho mas alta. Multiplicar por $R_{ib} = (\beta+1)(r_e + R_e)$

β +1 se denomina reflexión hacia la base

Ganancia de entrada

$$v_o = -i_c(R_C \parallel R_L) = -\alpha i_e(R_C \parallel R_L)$$

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\alpha(R_C \parallel R_L)}{r_e + R_e} \qquad A_v \cong -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_e}$$

La ganancia sin carga puede escribirse

$$A_{vo} = -\frac{\alpha R_C}{r_e + R_e} \qquad A_{vo} = -\frac{\alpha}{r_e}\frac{R_C}{1 + R_e/r_e}$$

La resistencia R_E reduce la ganancia de voltaje

$$A_{vo} = -\frac{g_m R_C}{1 + (R_e/r_e)} \cong -\frac{g_m R_C}{1 + g_m R_e}$$

Resistencia de salida

$$R_{\text{out}} = R_C$$

Ganancia de corriente en cortocircuito

$$i_{os} = -\alpha i_e \qquad i_i = v_i / R_{\text{in}} \qquad A_{is} = -\frac{\alpha R_{\text{in}} i_e}{v_i}$$

$$R_{\text{in}} = R_B \parallel R_{ib} \qquad i_b = (1 - \alpha) i_e = \frac{i_e}{\beta + 1} \qquad A_{is} = -\frac{\alpha (R_B \parallel R_{ib})}{r_e + R_e}$$

$$R_B \gg R_{ib} \qquad A_{is} = \frac{-\alpha(\beta + 1)(r_e + R_e)}{r_e + R_e} = -\beta$$

Ganancia total de la fuente a la carga

$$G_v = \frac{v_i}{v_{\text{sig}}} \cdot A_v = -\frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{sig}} + R_{\text{in}}} \frac{\alpha(R_C \parallel R_L)}{r_e + R_e}$$

Sustituyendo R_{in} por R_B // R_{ib}, considerando que $R_B >> R_{ib}$ y sustituyendo R_{ib} resulta:

$$G_v \cong -\frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{R_{\text{sig}} + (\beta + 1)(r_e + R_e)}$$

El voltaje base-emisor o v_π es una fracción del voltaje de entrada por lo tanto se pueden aplicar voltajes de mayor amplitud en la entrada sin que haya distorsión

$$\frac{v_\pi}{v_i} = \frac{r_e}{r_e + R_e} \cong \frac{1}{1 + g_m R_e}$$

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR

1.- La resistencia de entrada R_{ib} aumenta por el factor $(1+g_mR_e)$

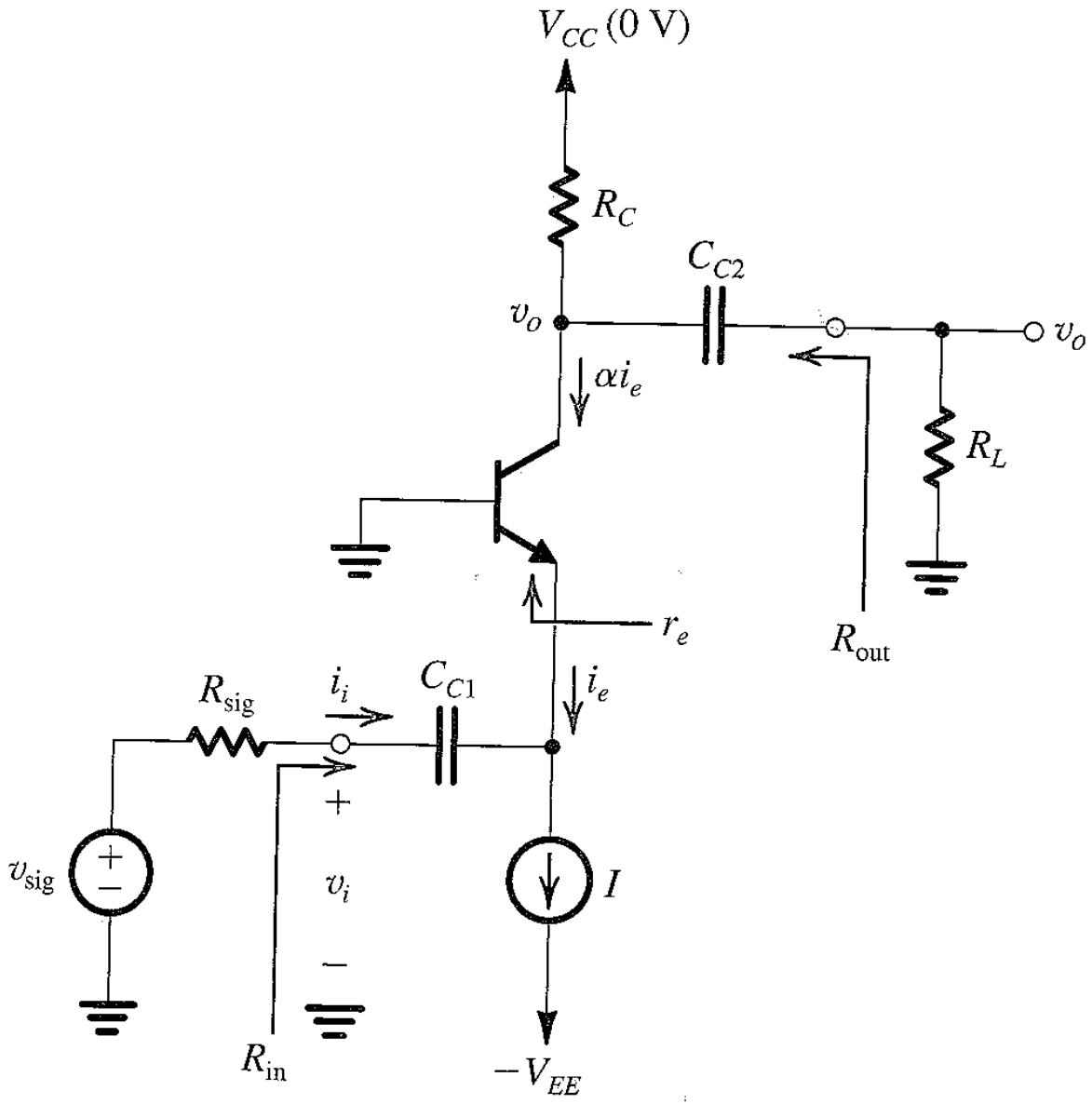
2.- La señal de entrada puede aumentarse por el factor $(1+g_mR_e)$

3.- La ganancia de voltaje total es menos dependiente de β. Si la resistencia R_{sig} es mucho menor que $(\beta +1)(Re +re)$ la ganancia de voltaje total es prácticamente independiente de β.

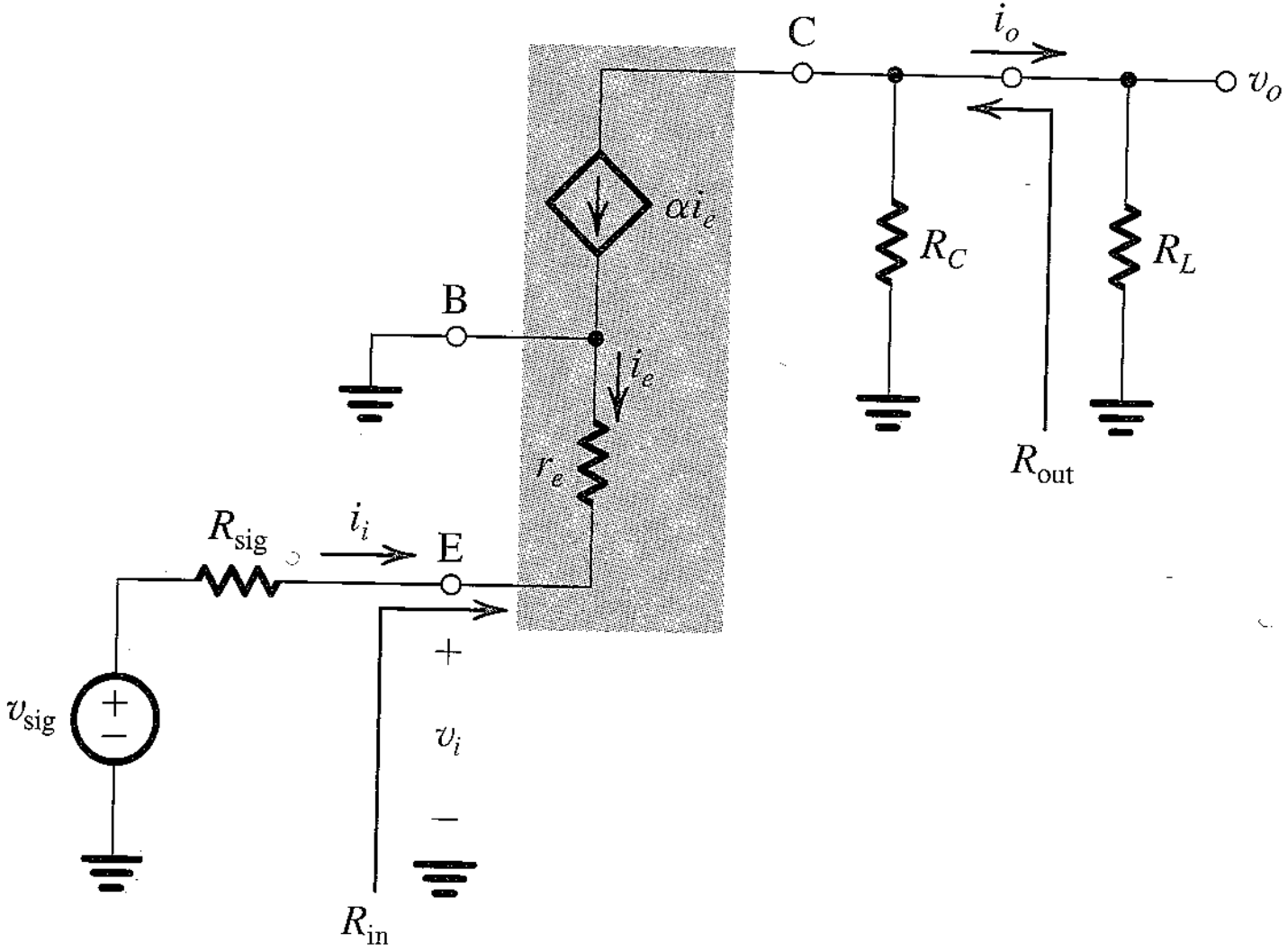
4.- La ganancia de voltaje de base a colector, A_V, se reduce por el factor $(1+g_mR_e)$. Esta es la desventaja que presenta este amplificador, a cambio de las otras ventajas indicadas.

5.- Al realizar el análisis en frecuencia se observa que la respuesta a altas frecuencias de esta configuración es mejor que la de la configuración emisor común sin resistencia de emisor.

CONFIGURACIÓN BASE COMÚN



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN



Resistencia de entrada: Por inspección: $R_{\text{in}} = r_e$

Nota: Si la polarización no se realiza con la fuente de corriente sino con una resistencia R_E entre Emisor y $-V_{EE}$, la resistencia de entrada es el paralelo de R_E con r_E

Para calcular la ganancia de voltaje: $v_o = -\alpha i_e (R_C \parallel R_L)$

La corriente de emisor es: $i_e = -\dfrac{v_i}{r_e}$

Por lo tanto la ganancia de voltaje es:

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = \frac{\alpha}{r_e}(R_C \parallel R_L) = g_m(R_C \parallel R_L)$$

Tiene signo positivo. La ganancia en circuito abierto es:

$$A_{vo} = g_m R_C$$

La resistencia de salida es: $R_{\text{out}} = R_C$

La ganancia de corriente en cortocircuito es:

$$A_{is} = \frac{-\alpha i_e}{i_i} = \frac{-\alpha i_e}{-i_e} = \alpha$$

La relación de voltaje entre el voltaje de la fuente y el de entrada al amplificador es

$$\frac{v_i}{v_{\text{sig}}} = \frac{R_i}{R_{\text{sig}} + R_i} = \frac{r_e}{R_{\text{sig}} + r_e}$$

Dado que r_e es del orden de los pocos ohmios, esta relación puede ser pequeña. La ganancia total se ve afectada por este factor

$$G_v = \frac{r_e}{R_{\text{sig}} + r_e} g_m (R_C \parallel R_L) = \frac{\alpha (R_C \parallel R_L)}{R_{\text{sig}} + r_e}$$

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

1.- La resistencia de entrada es muy baja

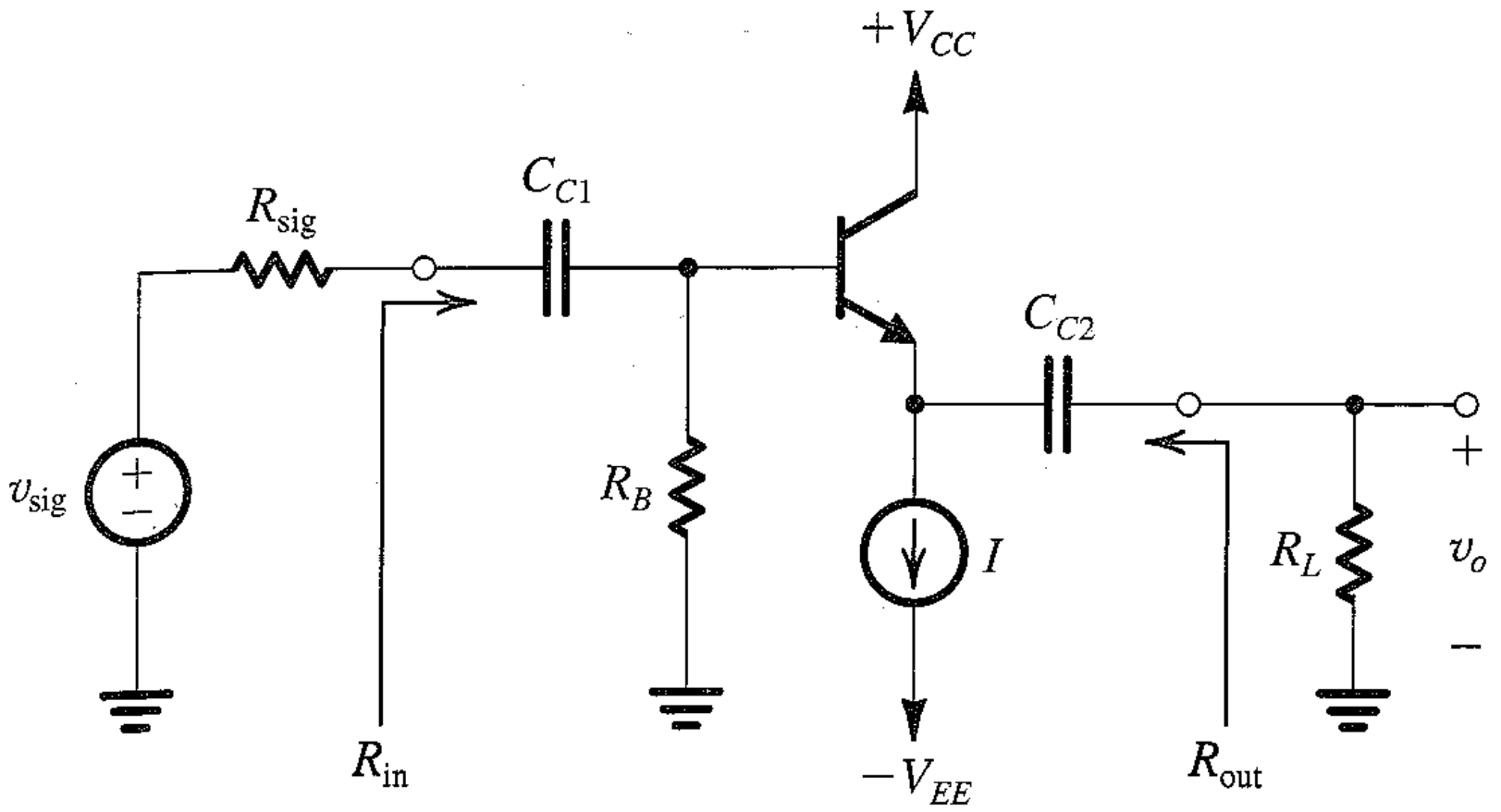
2.- La ganancia de corriente de cortocircuito A_{is} es aproximadamente 1.

3.- La ganancia de voltaje en circuito abierto es como la de la configuración emisor común, pero la ganancia de voltaje total es mucho más baja.

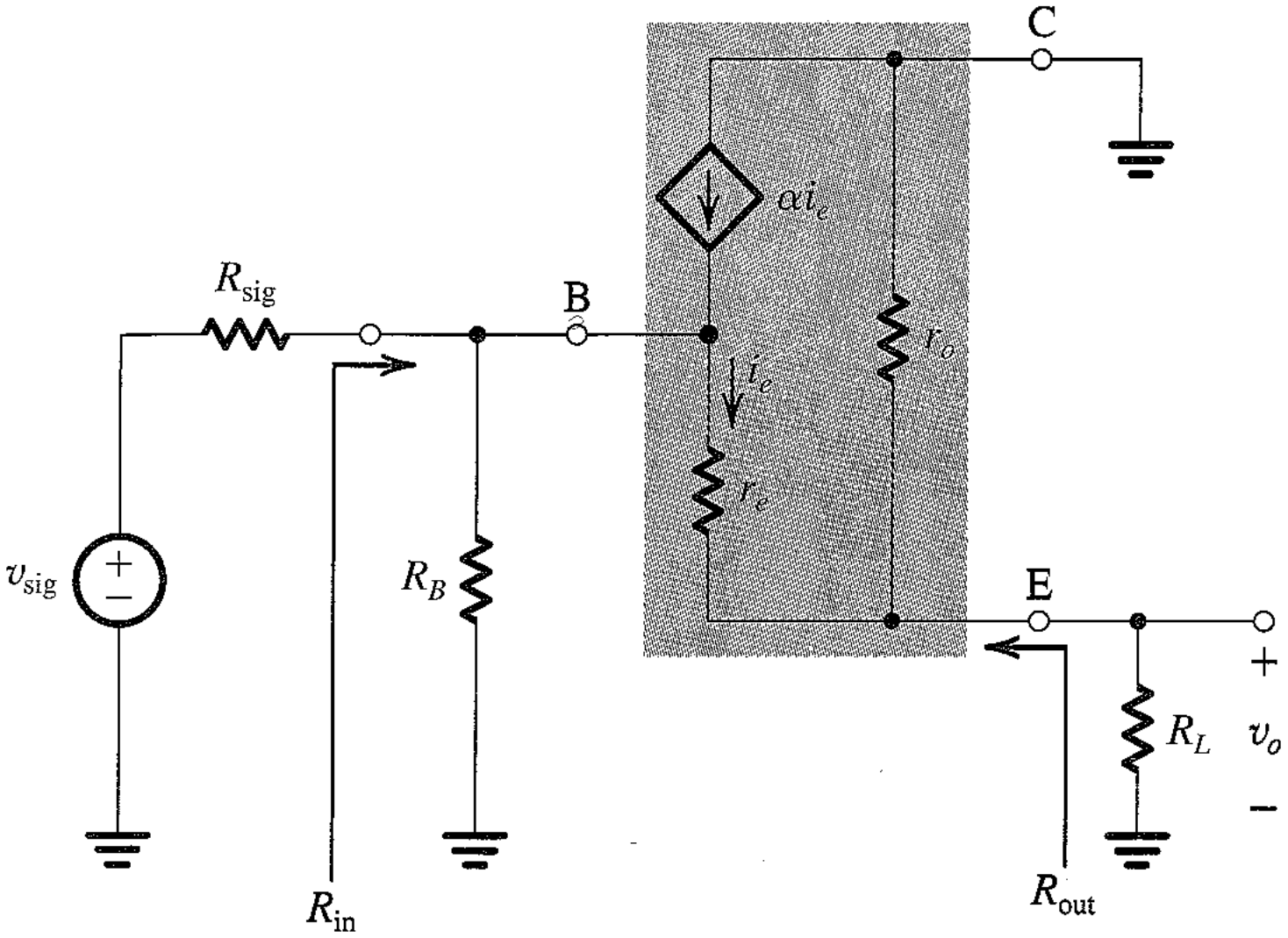
4.- La resistencia de salida es igual a la de las otras configuraciones analizadas: R_C.

5.- Esta configuración es excelente para el diseño de amplificadores de alta frecuencia.

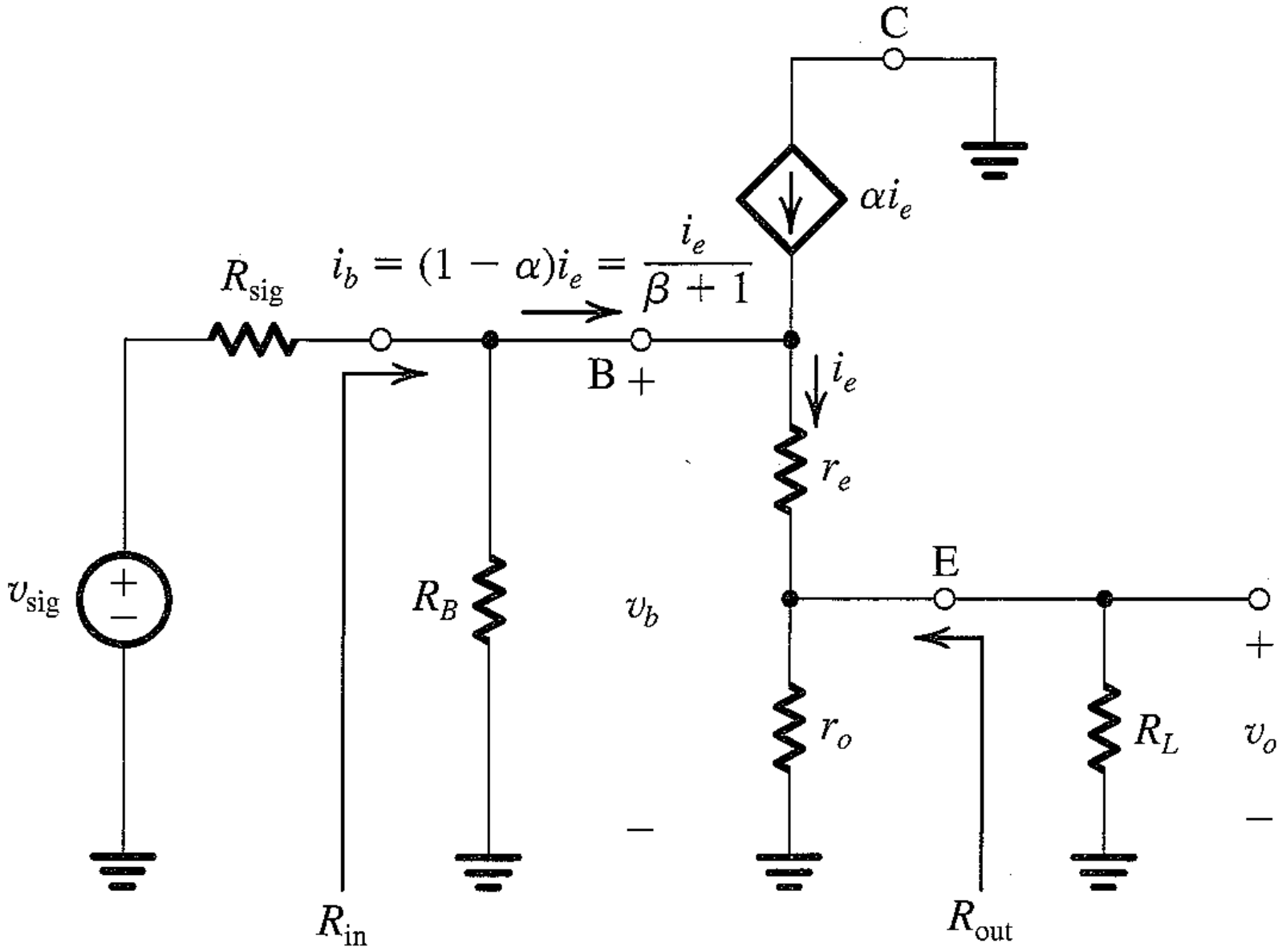
CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN (SI EXISTE RESISTENCIA DE EMISOR ESTÁ EN PARALELO CON R_L)

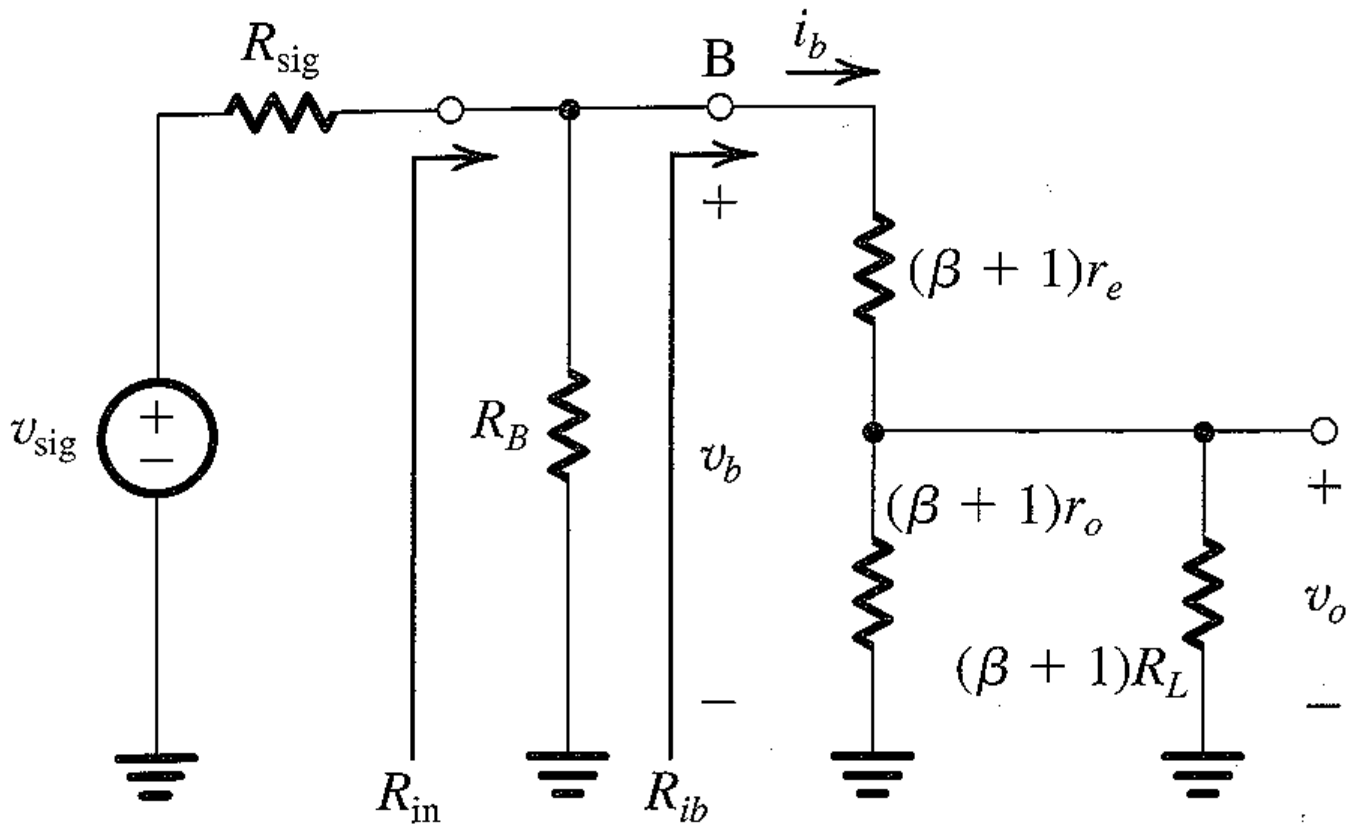


REUBICACIÓN DE LA RESISTENCIA r_0 YA QUE ESTÁ CONECTADA ENTRE EMISOR Y TIERRA



APLICACIÓN DE LA REFLEXIÓN DE RESISTENCIAS HACIA LA BASE

CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE ENTRADA $R_{in} = R_B // R_{ib}$



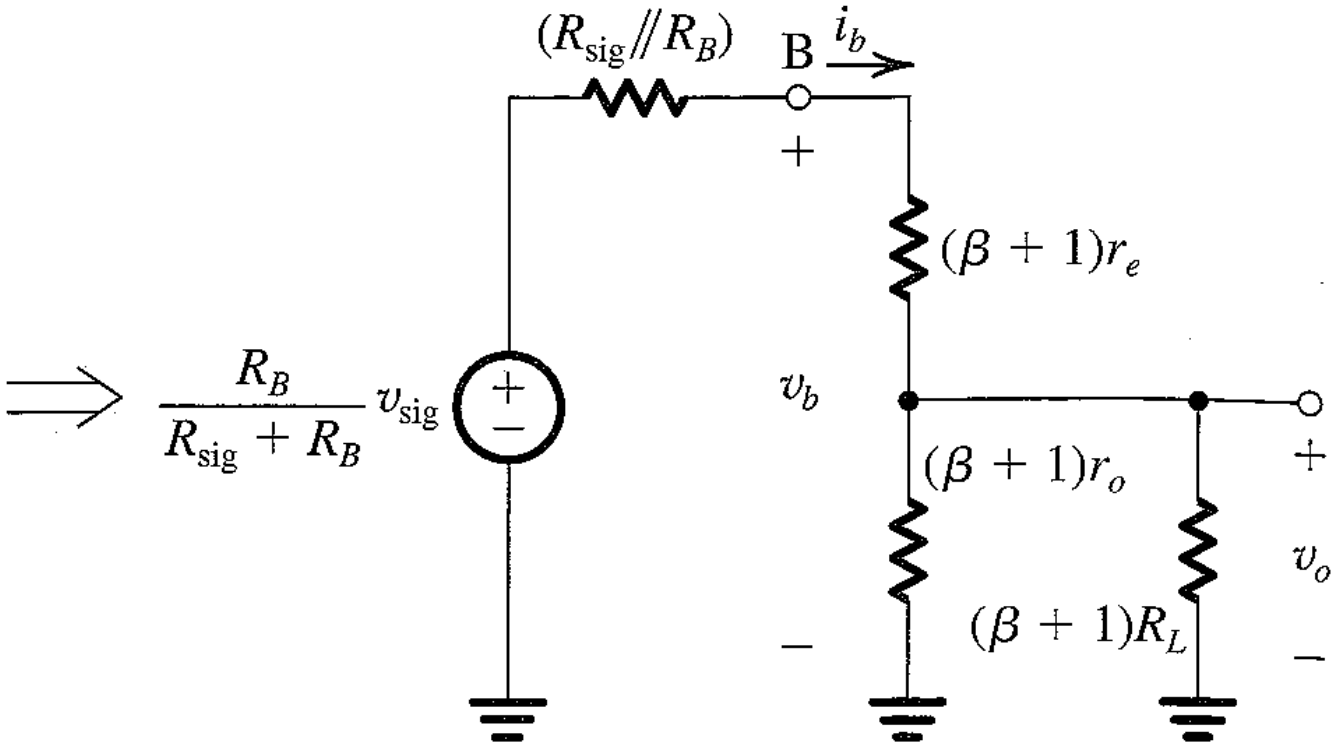
$$R_{in} = R_B // (\beta + 1)[r_e + (r_o // R_L)]$$

EQUIVALENTE THEVENIN HACIA LA IZQUIERDA DE LA BASE

$$V_{th} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \qquad R_{th} = R_{sig} // R_B$$

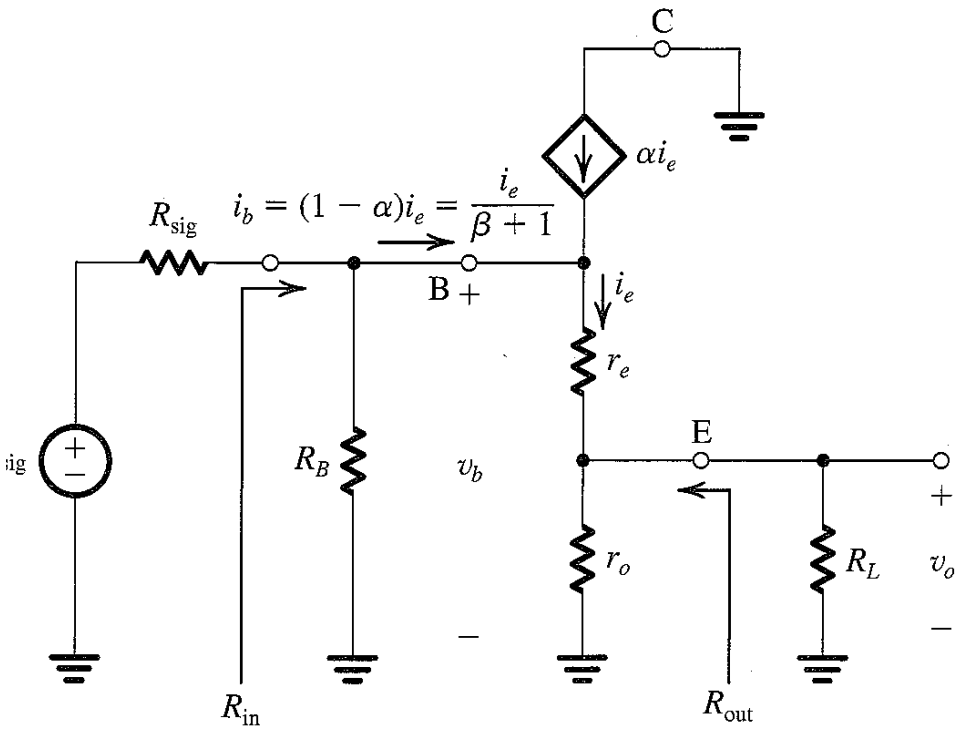
Ganancia <1 pero próxima a 1:

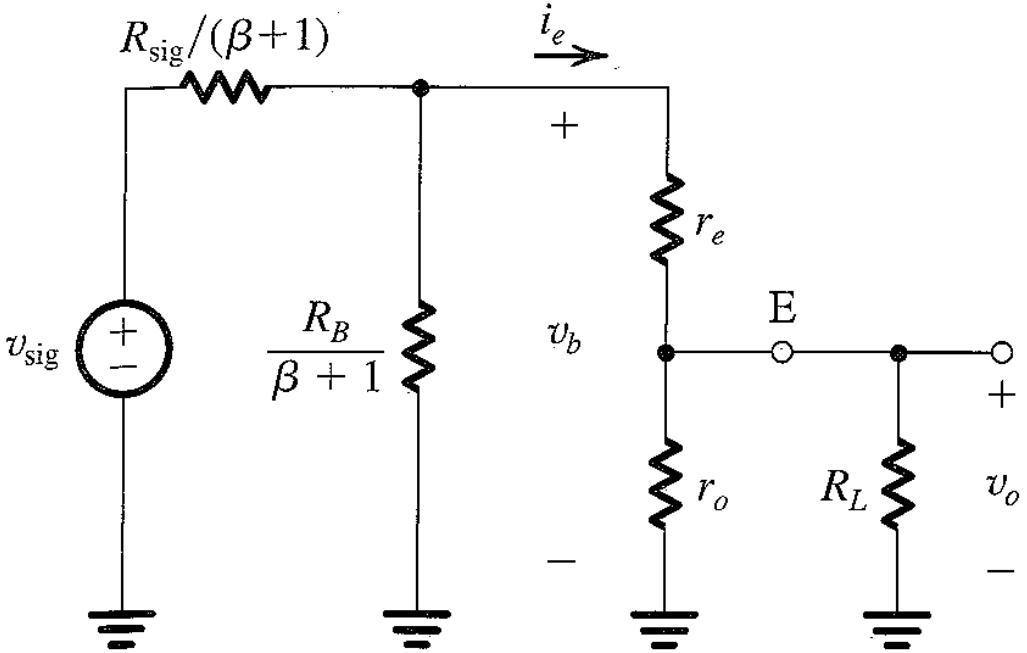
Seguidor de emisor



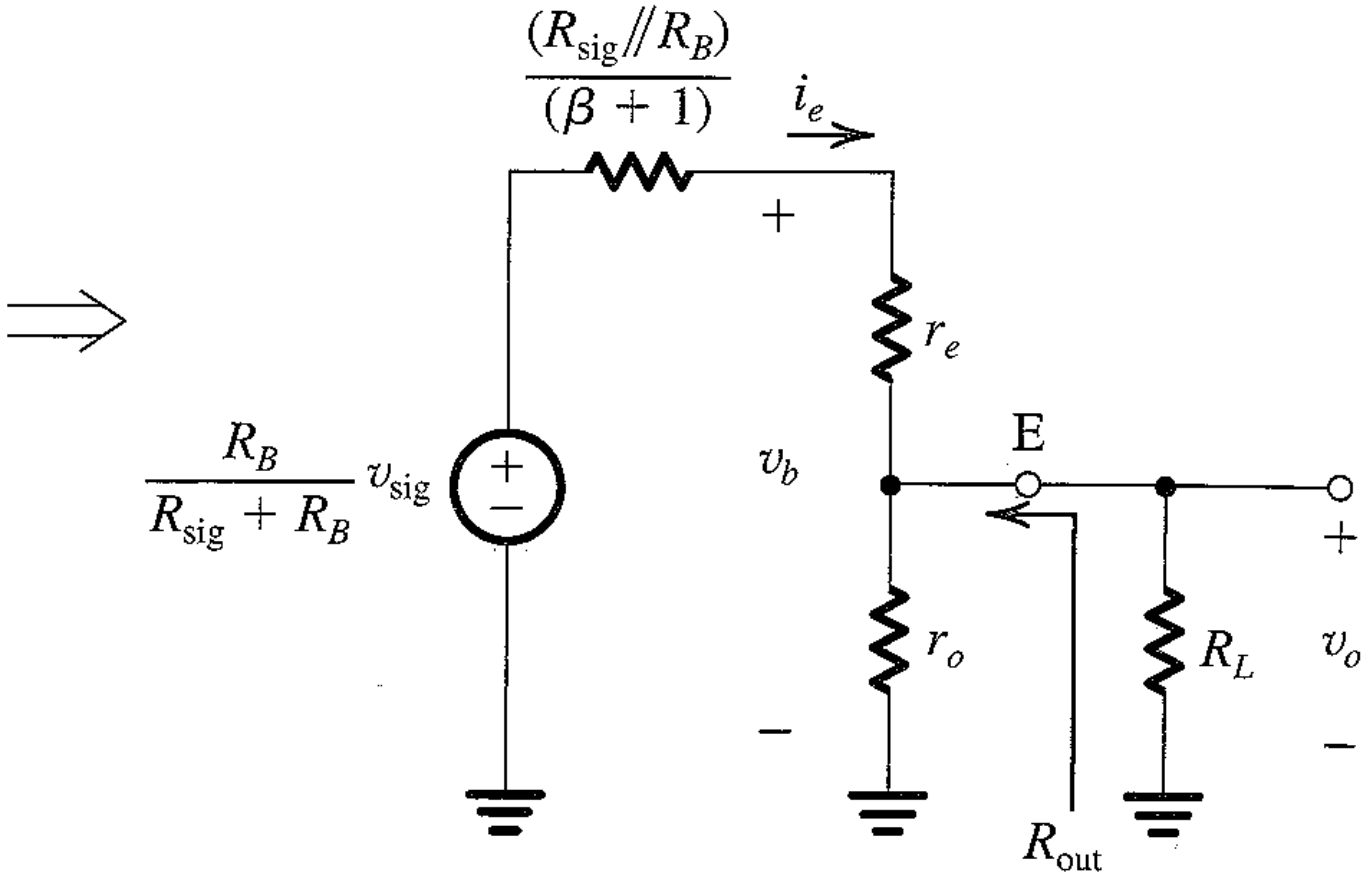
$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \frac{(\beta + 1)(r_o // R_L)}{(R_{sig} // R_B) + (\beta + 1)[r_e + (r_o // R_L)]}$$

APLICACIÓN DE LA REFLEXIÓN DE RESISTENCIAS HACIA EL EMISOR





OTRA FORMA DE CÁLCULO DE LA GANANCIA TOTAL G_V



$$G_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{R_B}{R_{sig} + R_B} \frac{(r_o /\!/ R_L)}{\frac{(R_{sig} /\!/ R_B)}{\beta + 1} + r_e + (r_o /\!/ R_L)}$$

Resistencia de salida

$$R_{\text{out}} = r_o \,\|\, \left(r_e + \frac{R_{\text{sig}} \,\|\, R_B}{\beta + 1} \right)$$

Es una resistencia de valor reducido

Si r_O es mucho mayor que las otras resistencias

$$R_{\text{out}} \cong r_e + \frac{R_{\text{sig}} \,\|\, R_B}{\beta + 1}$$

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR

1.- La resistencia de entrada es elevada.

2.- La resistencia de salida es reducida.

3.- La ganancia de voltaje es menor que 1 pero cercana a ese valor.

4.- Es útil para acoplar un circuito de alta impedancia de salida (considerado como fuente) con otro circuito de baja impedancia de entrada (considerado como carga).

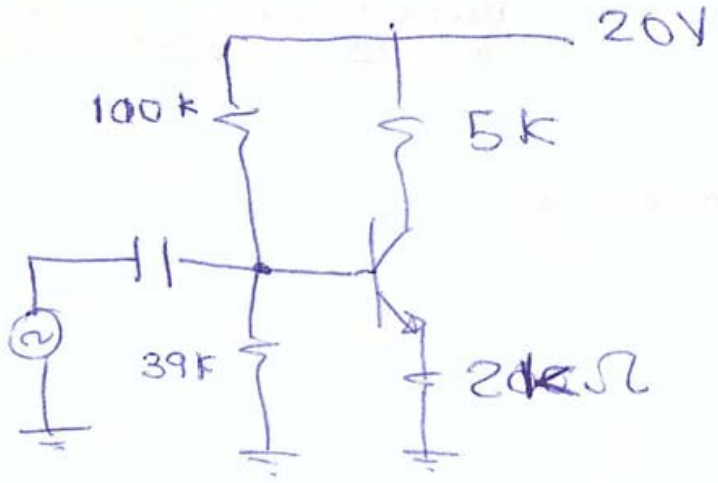
EJERCICIO: EMISOR COMÚN CON R_E

Punto de operación

$\beta = 100$

$V_{BE} = 0,7V$

$R_{BB} = 28\,K$



$$V_{BB} = \frac{39}{39+100} \times 20 = 5,6V$$

$$I_B = \frac{5,6 - 0,7}{28K + 2K(101)} = \frac{4,9V}{230K} = 0,0213\,mA$$

$$I_C = 2,13\,mA$$

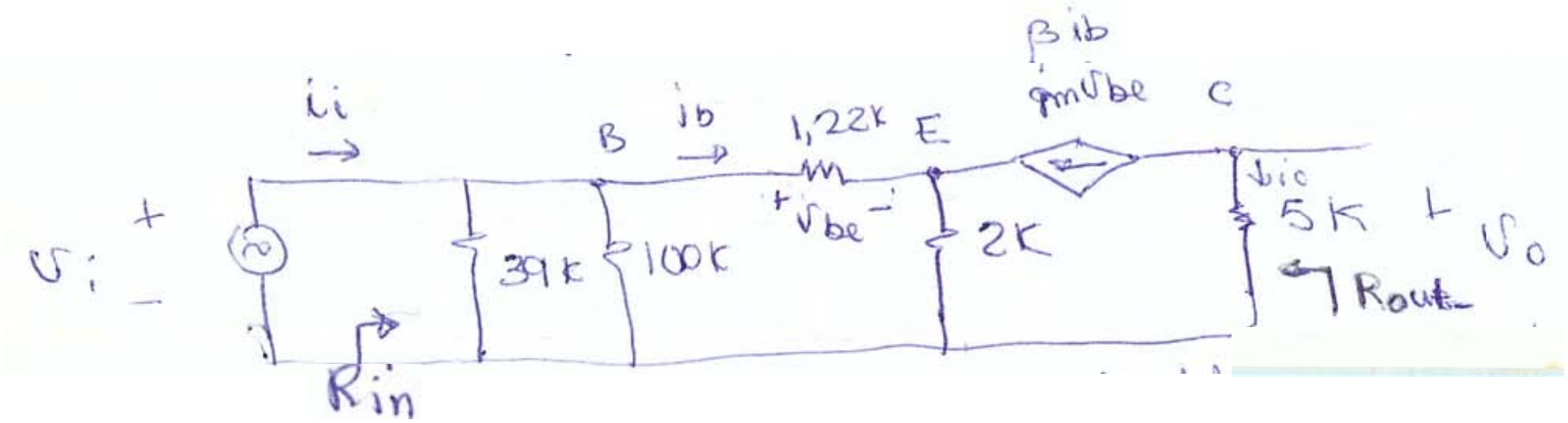
$$V_{CE} = 20V - 7K \times 2,13\,mA = 5,04V$$

Parámetros del modelo π

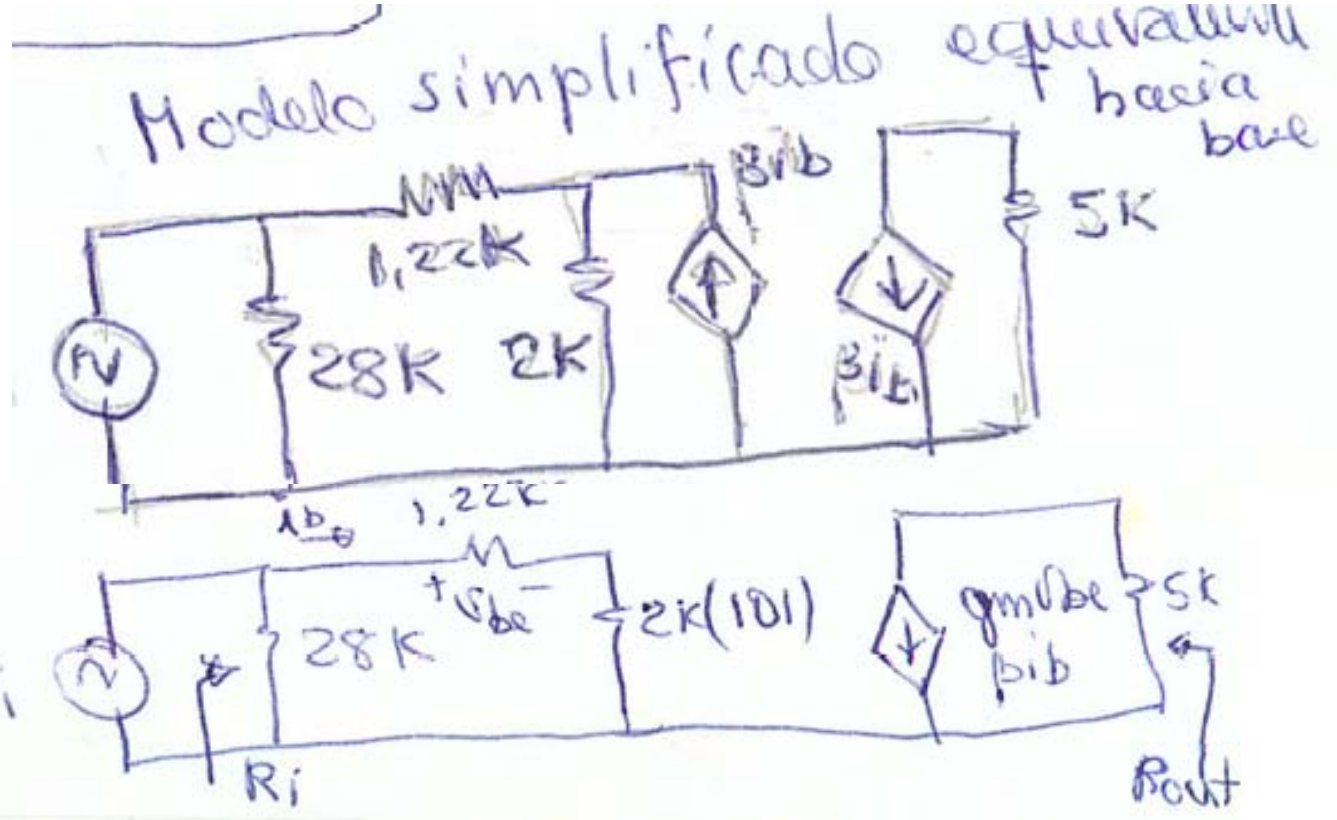
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2{,}13\ mA}{0{,}026\ V} = 81{,}92\ \frac{mA}{V}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100\ V}{81{,}92\ mA} = 1{,}22\ K\Omega$$

Circuito AC de pequeña señal



Circuito simplificado con reflexión de la impedancia de emisor hacia la base



$$V_o = -g_m 5K \times V_{be}$$

$$V_e = (\beta+1)\, 2K\, i_b$$

$$i_b = \frac{v_i}{1{,}22k + 2k(101)} = \frac{v_i}{203{,}22\,k}$$

$$i_b = \frac{v_i}{1{,}22k + 2k(101)} = \frac{v_i}{203{,}22\,k}$$

$$v_o = -5k\,\beta\, i_b = -5k\,\beta\,\frac{v_i}{203{,}22\,k} = -2{,}46\,v_i$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -2{,}46$$

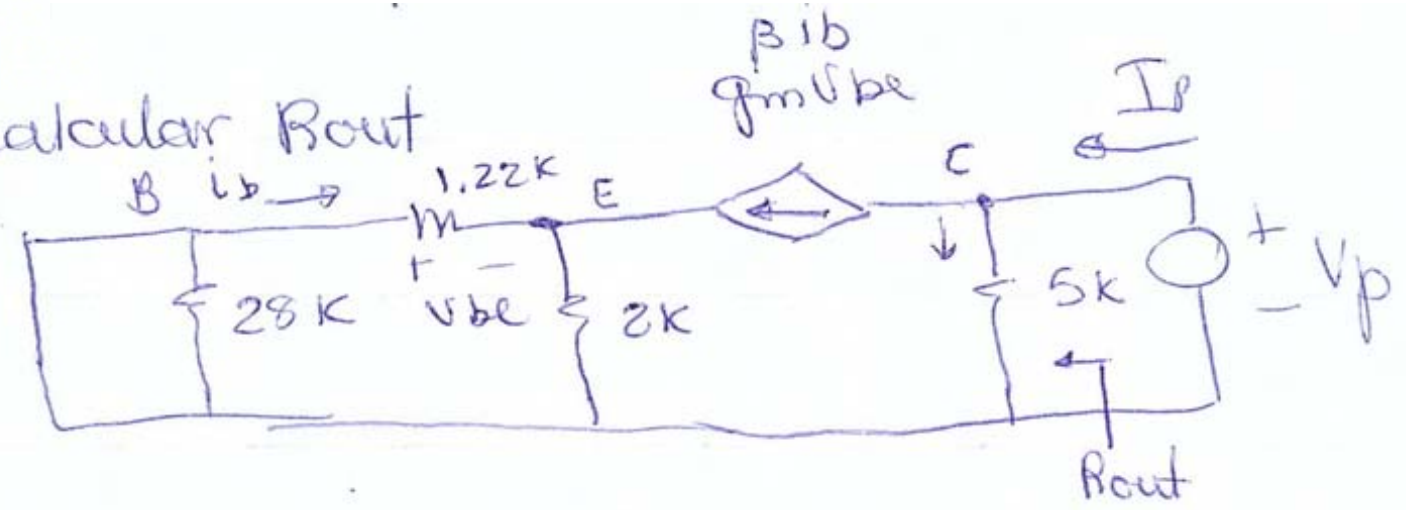
$$R_i = 39k \,//\, 100k \,//\, R_B = 28\,k \,//\, (1{,}22k + 202k)$$

$$R_{in} = 24{,}6\,k$$

$$i_i = \frac{V_i}{R_i} \qquad i_o = \frac{V_o}{5K}$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{V_o}{5K}\,\frac{R_i}{V_i} = A_V\,\frac{R_i}{5K} = -12{,}10$$

Para calcular Rout



$$I_p = \frac{V_p}{5k} + g_m V_{be} \qquad V_{be} = -V_e$$

$$1.22\, i_b = -2k(\beta+1)\, i_b \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow V_{be} = 0$$

$$I_p = \frac{V_p}{5k} \Rightarrow \quad R_{out} = \frac{V_p}{I_p} = 5k$$

La ganancia de voltaje es reducida, debido al efecto de la resistencia de Emisor.

La resistencia de entrada es elevada.

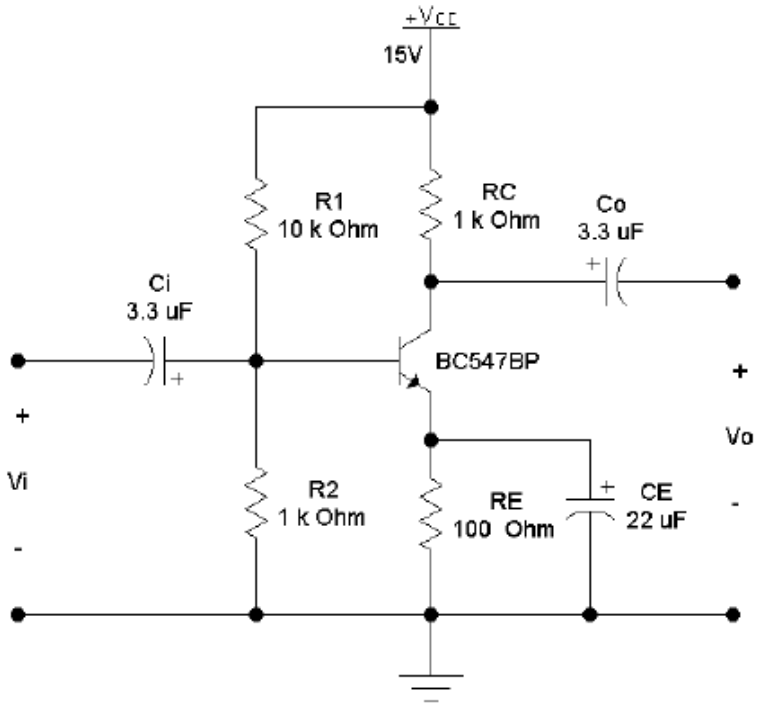
La resistencia de salida es igual a la de la configuración Emisor común.

CONDENSADORES DE ACOPLE Y DESACOPLE

En el amplificador Emisor Común mostrado hay tres condensadores:

*Entre el generador de entrada y la base del transistor: La señal AC no afecta el punto de operación.

*En la salida, para conectar a él la resistencia de carga: La carga no afecta el punto de operación

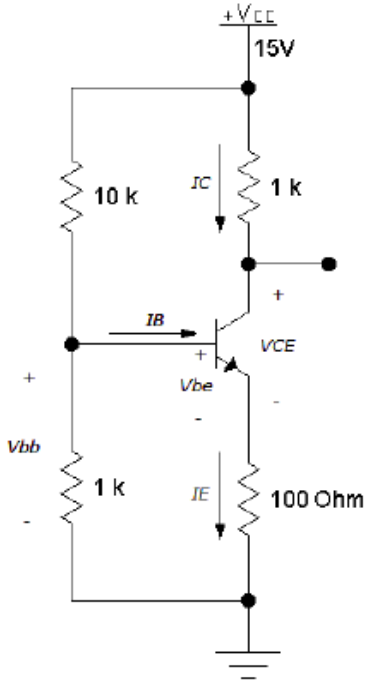


*En paralelo con la resistencia de Emisor: La resistencia R_E no afecta la ganancia AC.

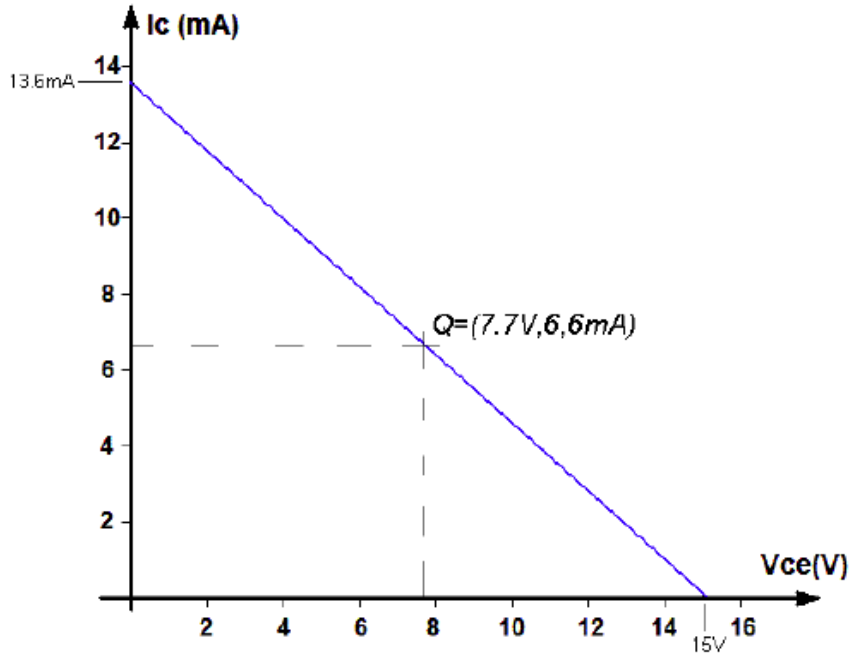
Para el análisis AC la impedancia de los condensadores se considera infinita.

RECTA DE CARGA EN DC

Al hacer el análisis, y especialmente el diseño de un amplificador, hay que estudiar con cuidado las rectas de carga. Para el análisis en DC se considera el circuito mostrado, se determina el punto de operación y se ubica la recta de carga en el plano I_C vs V_{CE}. Al diseñar, es usual ubicar el punto de operación para tener el mayor rango de amplificación posible.



Circuito equivalente de continua



Recta de carga en continua

RECTA DE CARGA EN AC

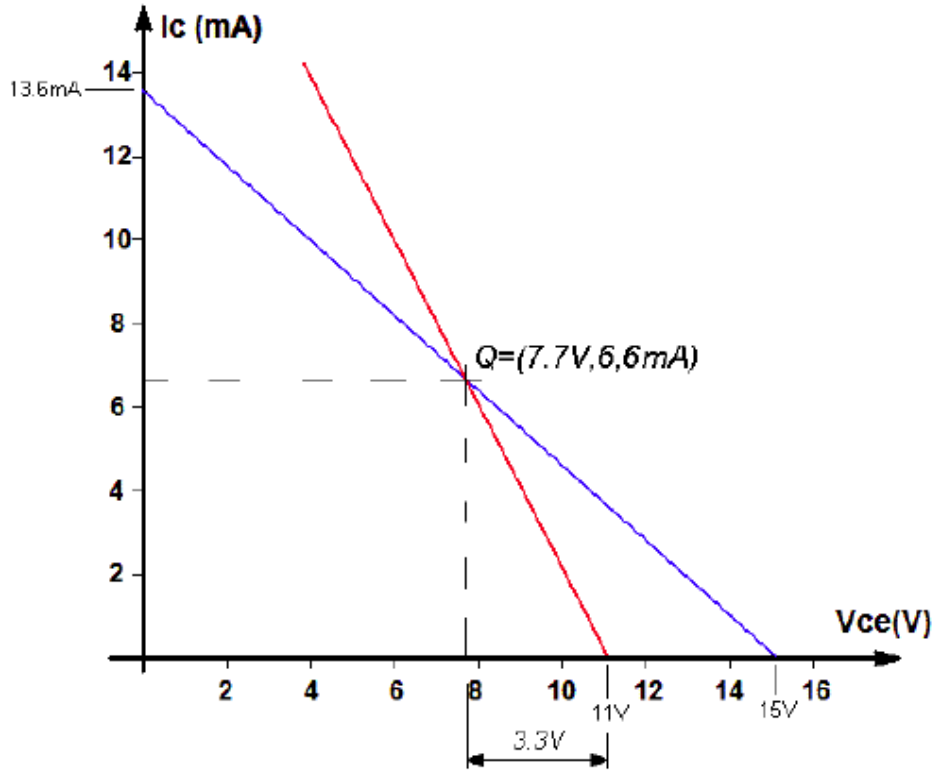
Al conectar la fuente y la carga a través de los condensadores y desacoplar la resistencia de Emisor, la pendiente de la recta de carga, sobre la que verdaderamente va a realizar su excursión la señal de salida, se modifica.

Con condensador de emisor:

$$m_{AC} = \frac{1}{R_C // R_L}$$

Sin condensador de emisor:

$$m_{AC} = \frac{1}{R_E + R_C // R_L}$$



Recta de carga en alterna