

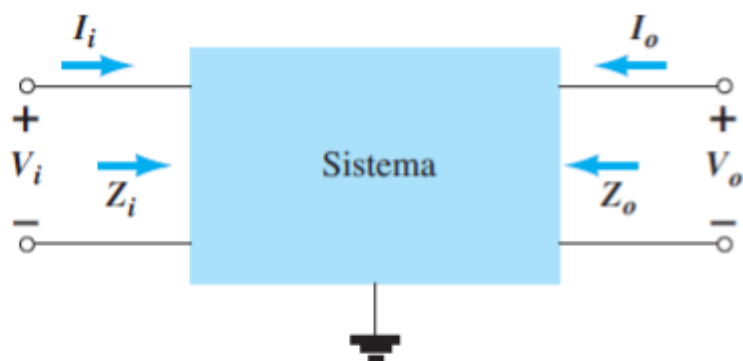
TRANSISTOR BJT EN AC

INTRODUCCIÓN

- Tres modelos para el análisis de ac de señal pequeña de redes de transistores
 - Modelo r_e
 - Modelo π híbrido
 - Modelo equivalente híbrido

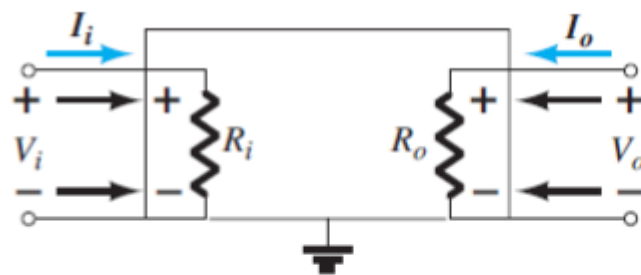
MODELO DE UN TRANSISTOR BJT

Un modelo es una combinación de elementos de un circuito, apropiadamente seleccionados, que simula de forma aproximada el comportamiento real de un dispositivo semiconductor en condiciones específicas de operación.



Definición de los parámetros importantes de cualquier sistema.

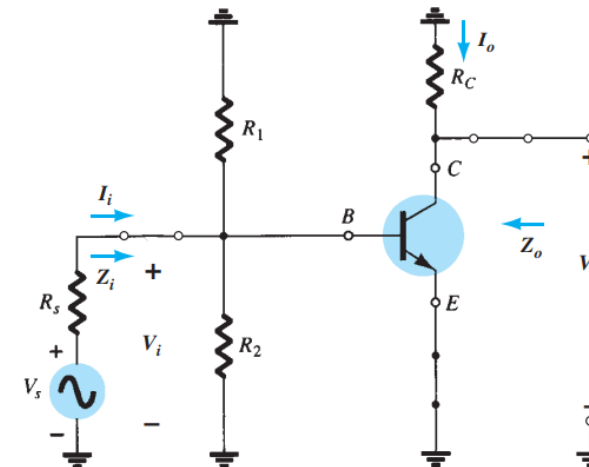
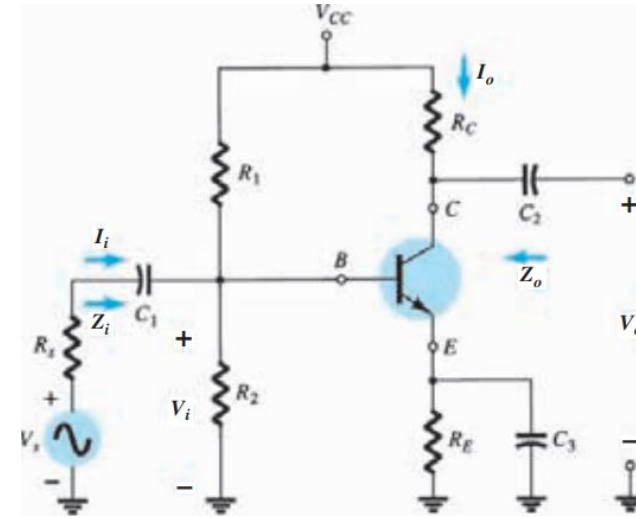
$$Z_i = V_i/I_i \text{ y } Z_o = V_o/I_o$$



Demostración de la razón para las direcciones y polaridades definidas.

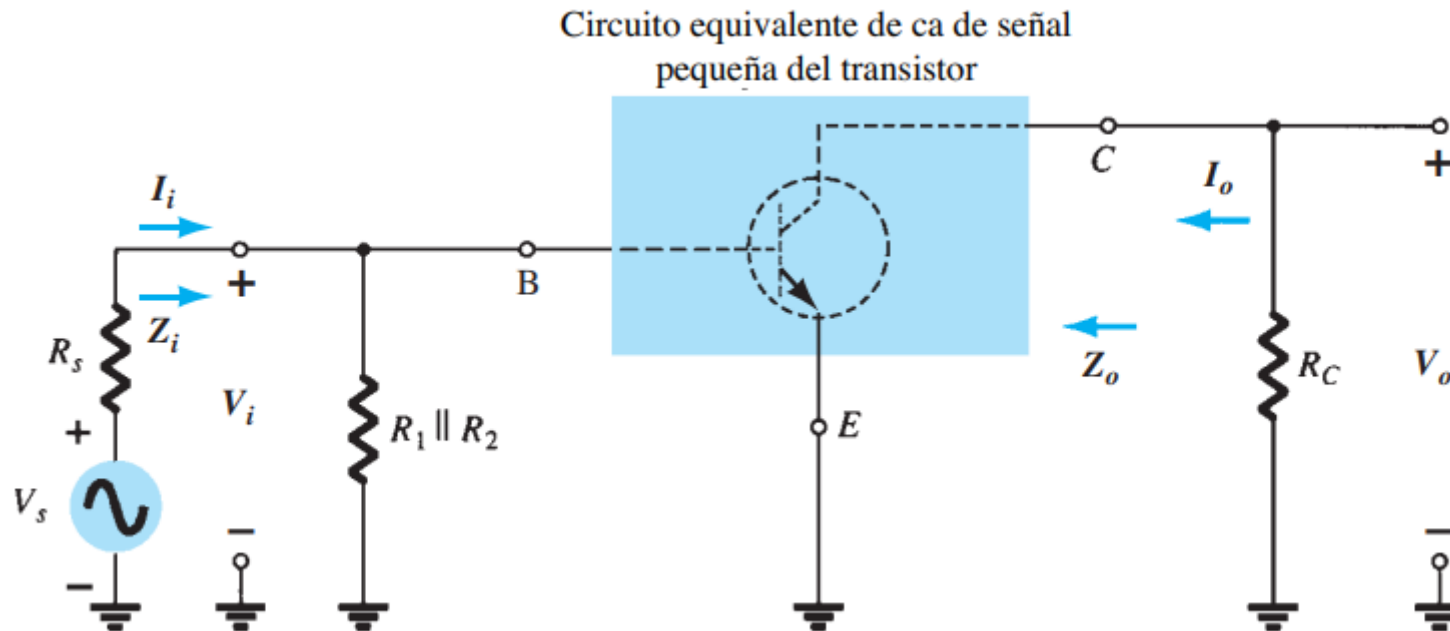
MODELO DE UN TRANSISTOR BJT

- Todas las fuentes de dc se reemplazan por un equivalente de potencial cero (cortocircuito).
- Los niveles dc son importantes para determinar el punto Q de operación correcta.
- Capacitores de acomplamiento C_1 , C_2 y C_3 se seleccionan para que tengan una reactancia muy pequeña en la frecuencia de aplicación. Esto conlleva a que pueden ser reemplazados por una baja resistencia o un cortocircuito.

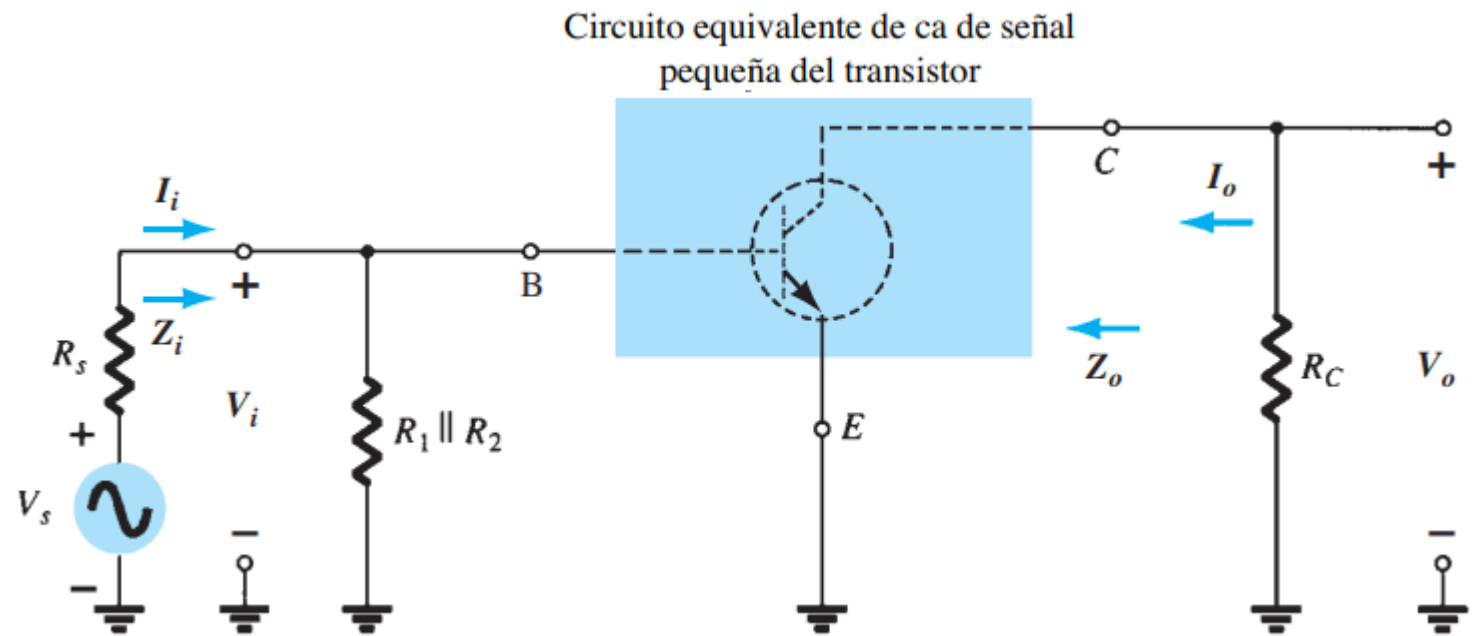
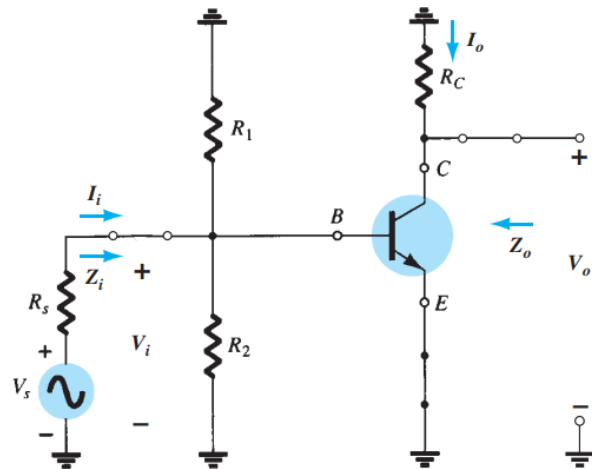
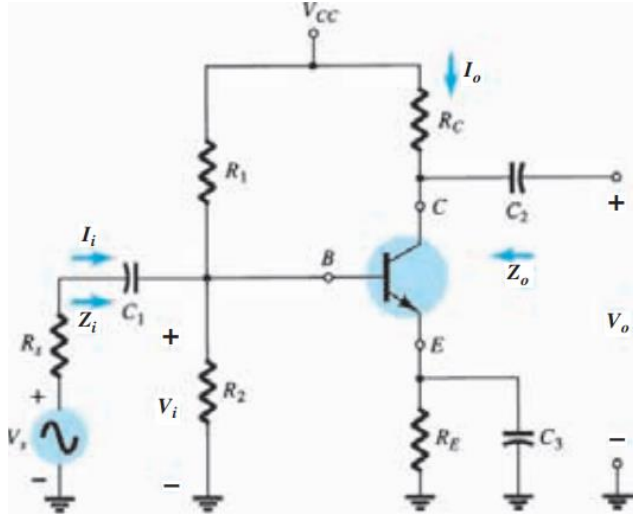


MODELO DE UN TRANSISTOR BJT

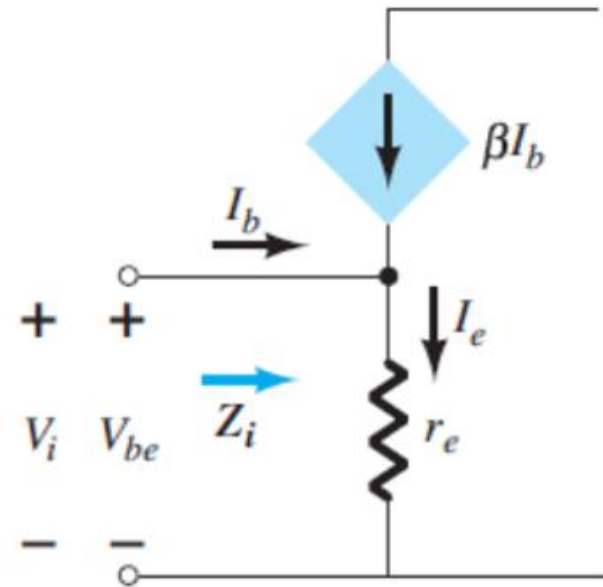
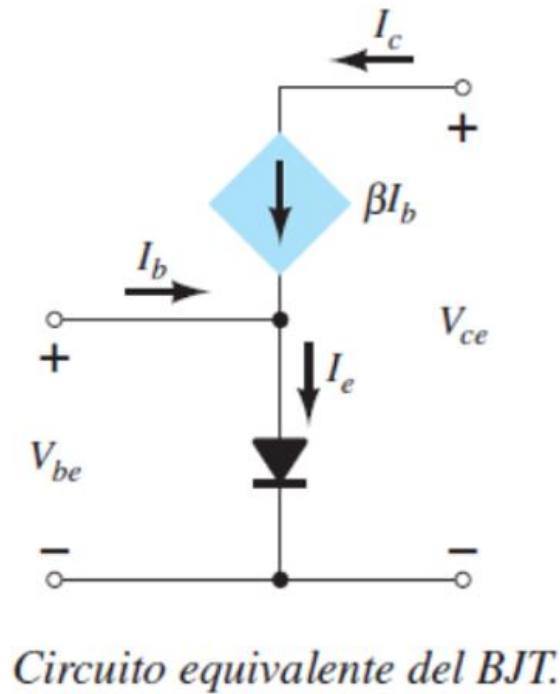
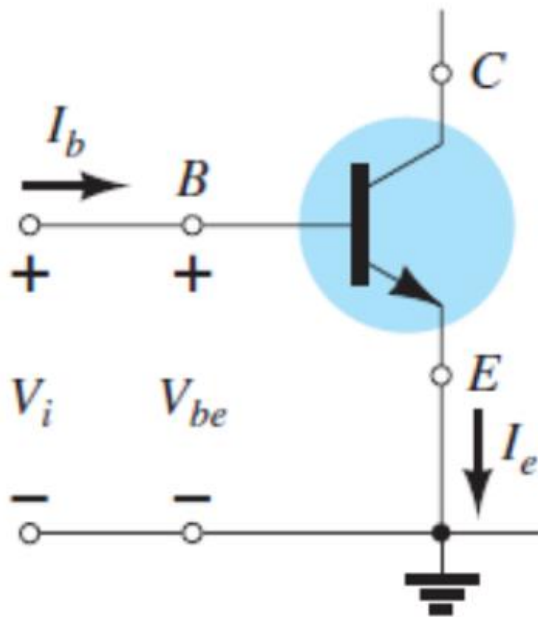
- El equivalente ac de una red:
 - Poner a cero todas las fuentes de voltaje, reemplazarlas por un cortocircuito.
 - Reemplazar los capacitores por un cortocircuito.



MODELO DE UN TRANSISTOR BJT



MODELO r_e DEL TRANSISTOR EMISOR COMÚN

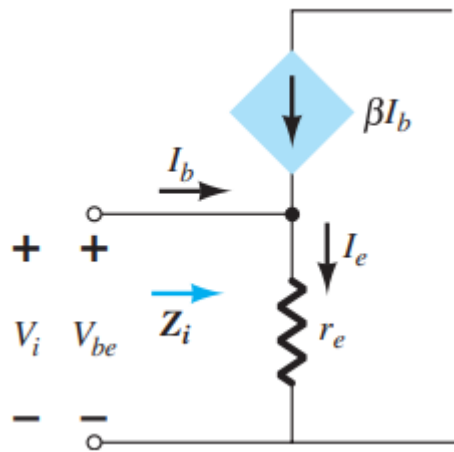


Definición del nivel de Z_i .

$$r_e = 26 \text{ mV} / I_E.$$

$$Z_i = \frac{V_{be}}{I_b} = \frac{(\beta + 1)I_b r_e}{I_b} = (\beta + 1)r_e \cong \beta r_e$$

MODELO r_e DEL TRANSISTOR EMISOR COMÚN



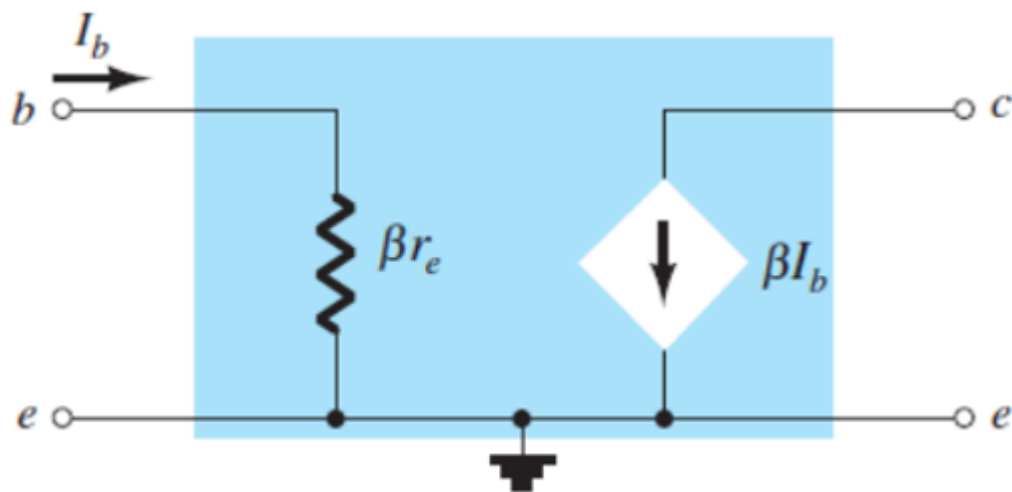
$$r_D = 26 \text{ mV}/I_D.$$

$$r_e = 26 \text{ mV}/I_E.$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_b} = \frac{V_{be}}{I_b}$$

$$\begin{aligned} V_{be} &= I_e r_e = (I_c + I_b) r_e = (\beta I_b + I_b) r_e \\ &= (\beta + 1) I_b r_e \end{aligned}$$

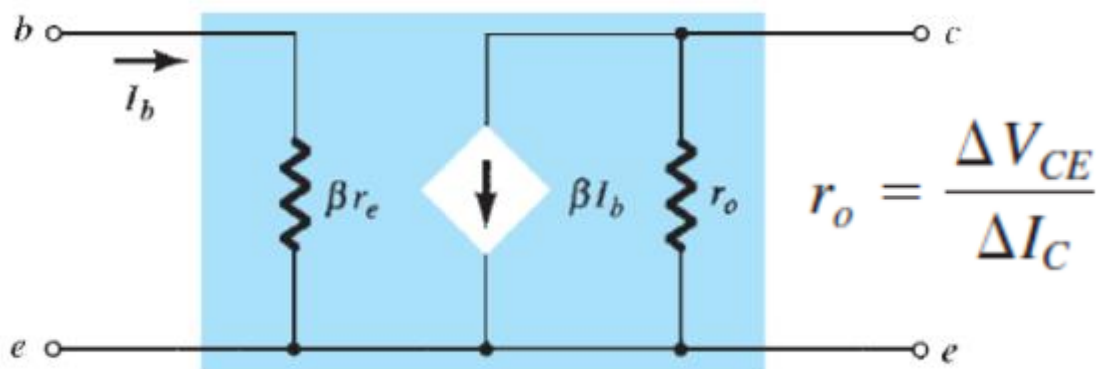
$$Z_i = \frac{V_{be}}{I_b} = \frac{(\beta + 1) I_b r_e}{I_b} = (\beta + 1) r_e \cong \beta r_e$$



Circuito equivalente mejorado de un BJT.

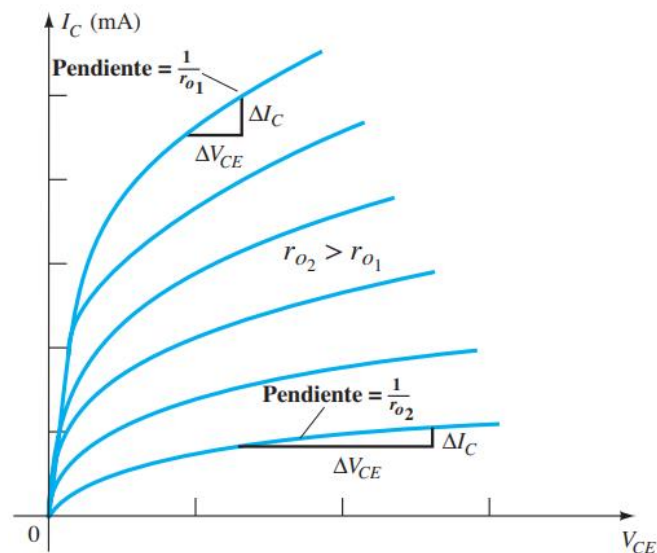
La impedancia de la base de la red es una resistencia igual a beta veces el valor de r_e .

La corriente de salida del colector es igual a la corriente de entrada por beta.



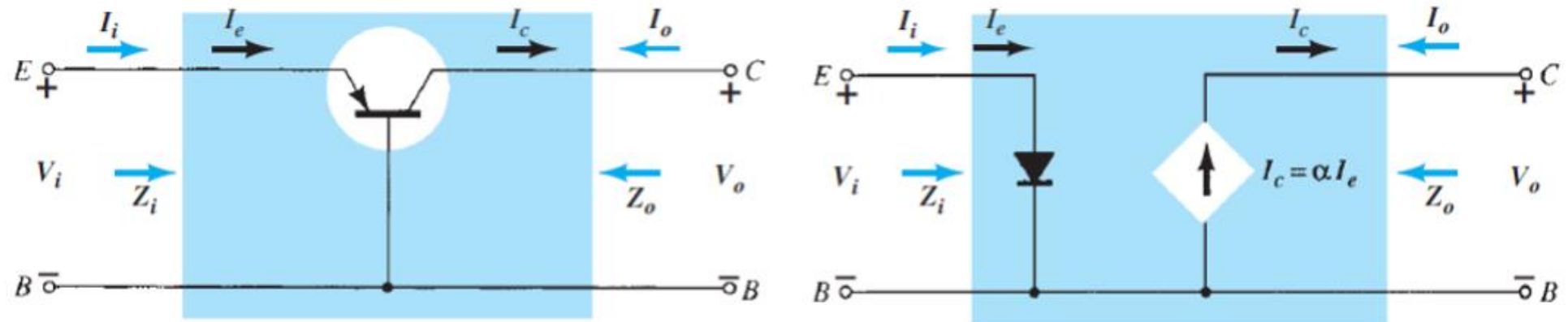
Modelo r_e de la configuración de transistor en emisor común incluido el efecto de r_e

$$r_o = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}$$

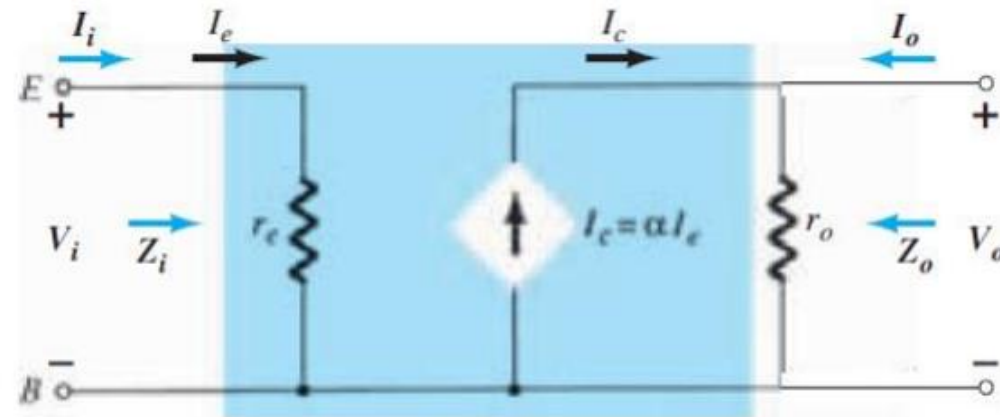


Cuanto más cambia VCE por el mismo cambio de I_C , mayor será la resistencia de salida. Entre más horizontal sea la curva, mayor será la resistencia de salida.

CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

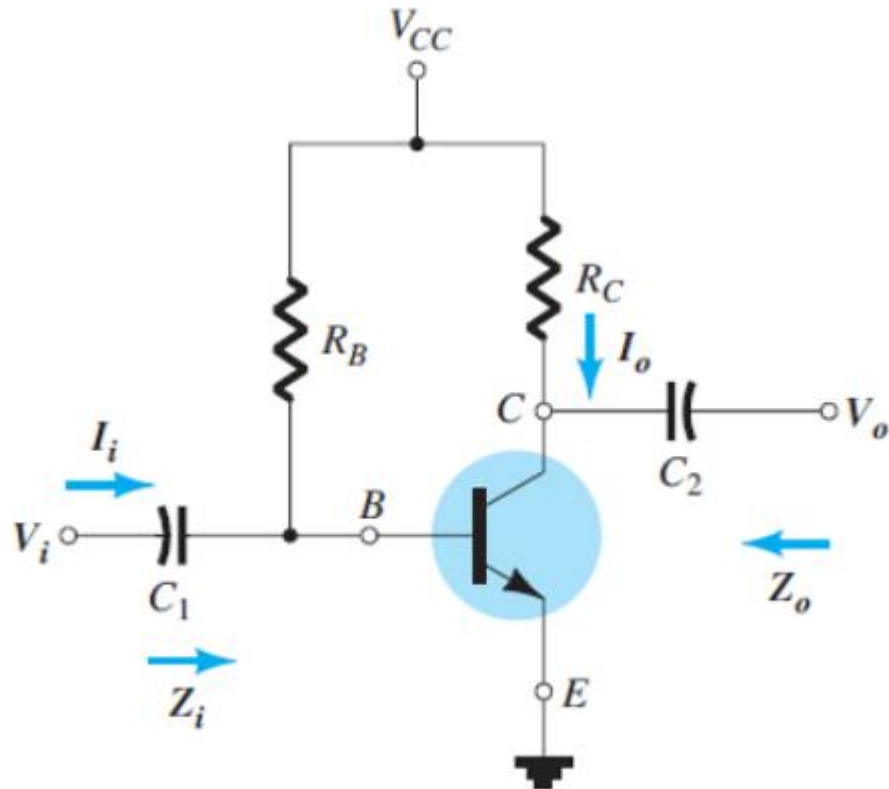


(a) Transistor BJT en base común; (b) circuito equivalente de la configuración de (a).

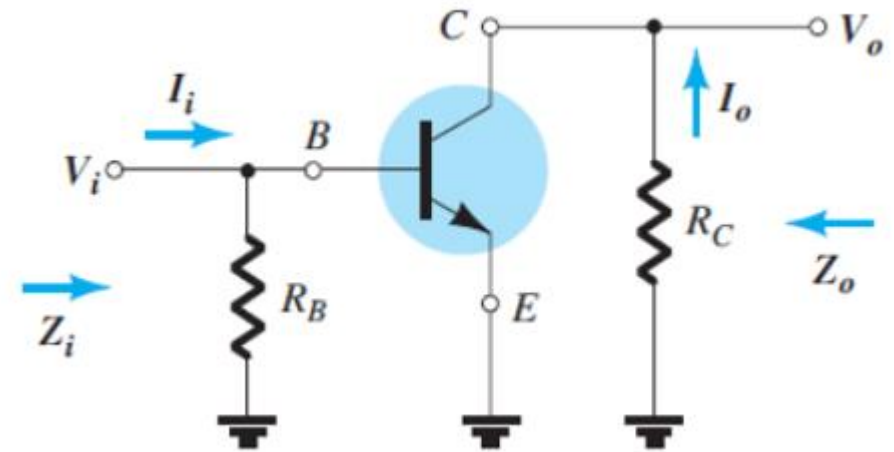


Circuito equivalente r_e en base común.

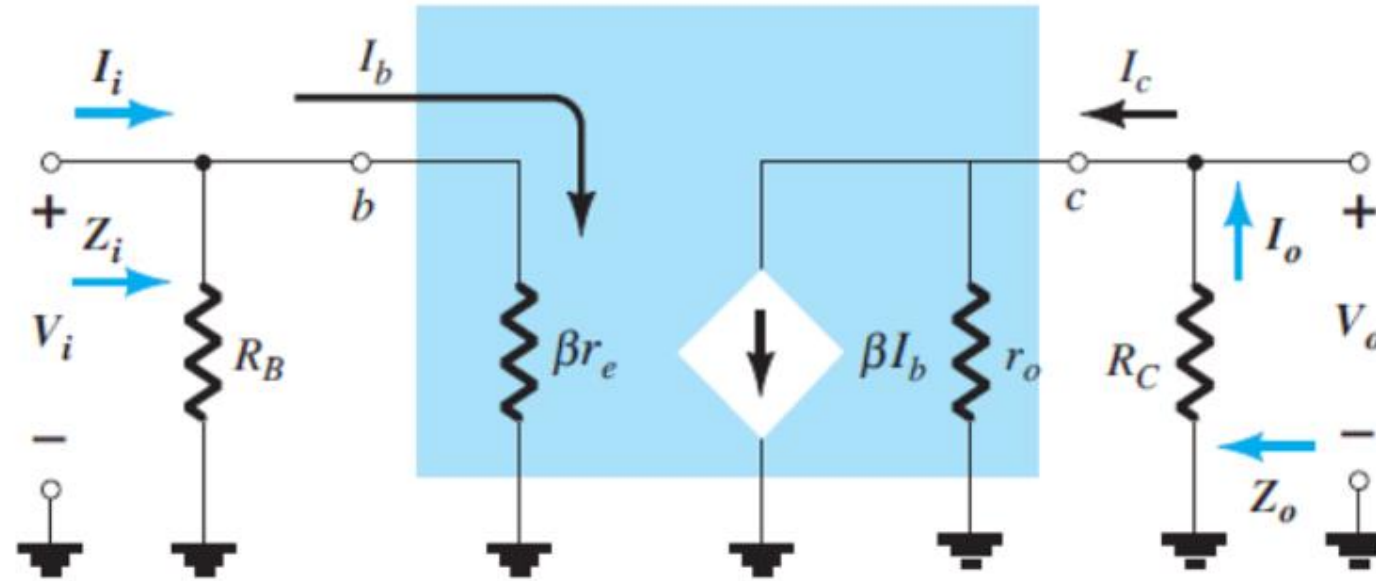
CONFIGURACIÓN POLARIZACIÓN FIJA EMISOR COMÚN



Configuración de polarización fija en emisor común.



CONFIGURACIÓN POLARIZACIÓN FIJA EMISOR COMÚN



Z_o se determina cuando $V_i = 0$, $I_i = 0$. El resultado es un circuito abierto para la fuente de corriente

Sustitución del modelo r_e

$$Z_i = R_B \parallel \beta r_e$$

ohms

$$Z_i \cong \beta r_e$$

$$R_B \geq 10\beta r_e$$

ohms

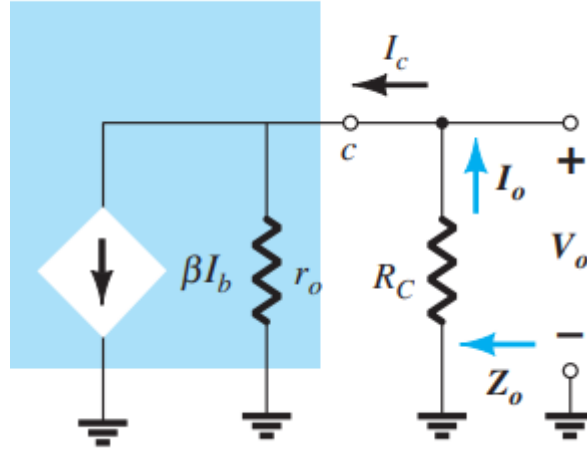
$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

ohms

$$Z_o \cong R_C$$

$$r_o \geq 10R_C$$

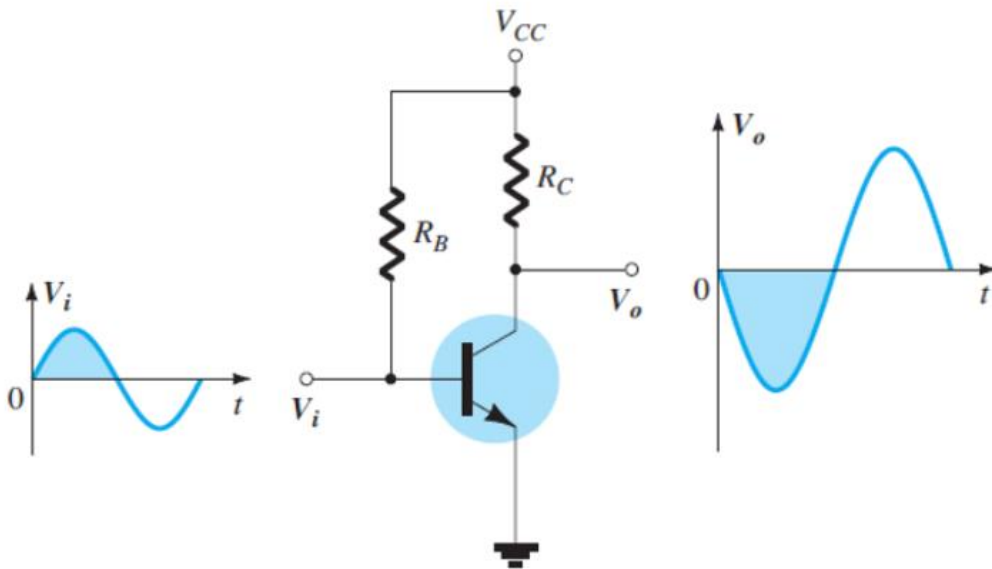
CONFIGURACIÓN POLARIZACIÓN FIJA EMISOR COMÚN



$$V_o = -\beta I_b (R_C \parallel r_o)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C \parallel r_o)$$



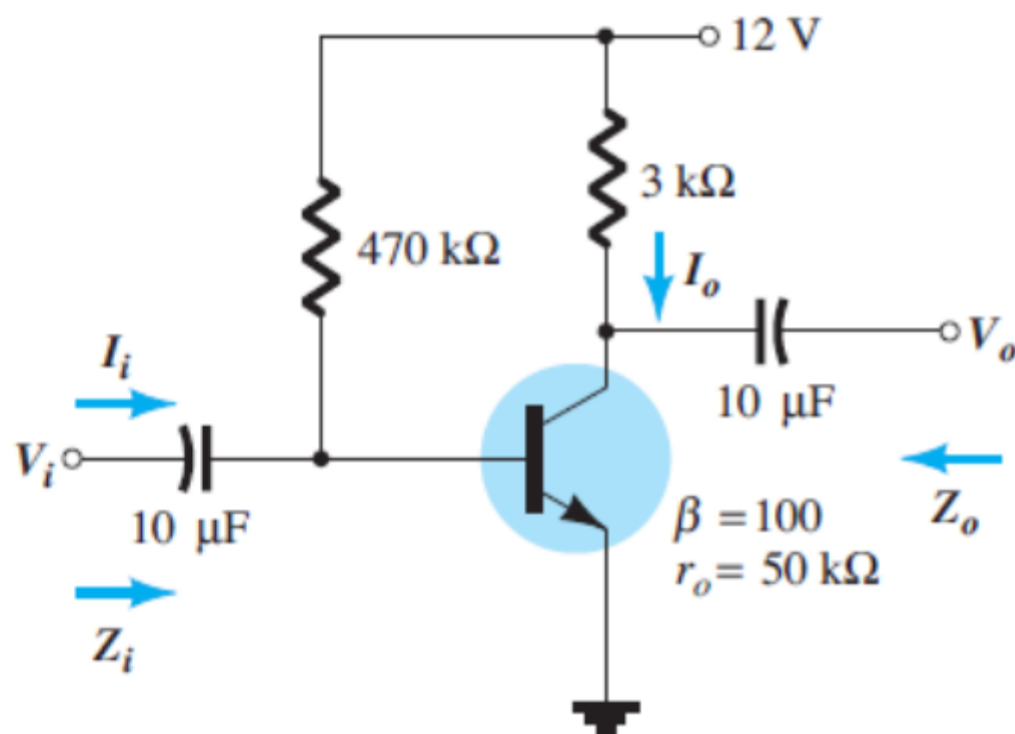
Desfasamiento de 180 grados entre las señales de entrada y salida. Signo negativo de A_v

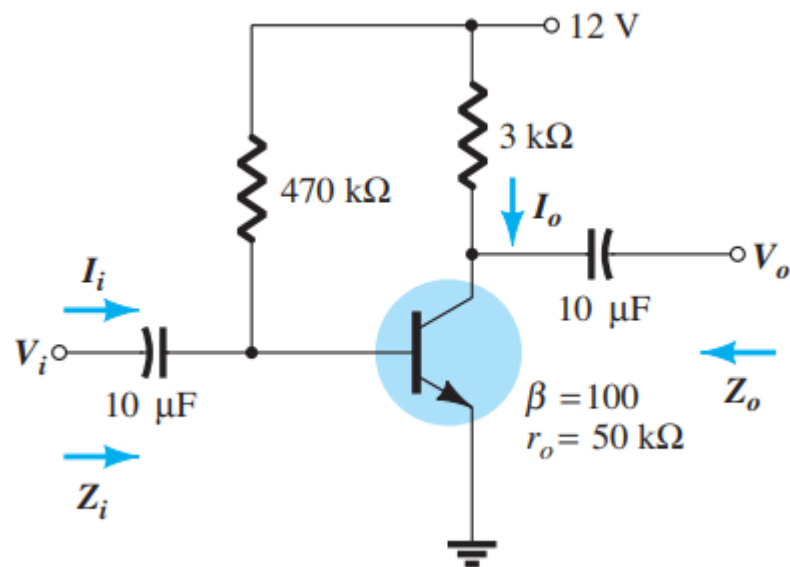
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e}$$

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} \quad r_o \geq 10R_C$$

EJEMPLO

- Determine r_e .
- Encuentre Z_i (con $r_o = \infty \Omega$).
- Calcule Z_o (con $r_o = \infty \Omega$).
- Determine A_v (con $r_o = \infty \Omega$).
- Repita las partes (c) y (d), incluida $r_o = 50 \text{ k}\Omega$ en todos los cálculos y compare los resultados.





a. Análisis de cd:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega} = 24.04 \mu\text{A}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (101)(24.04 \mu\text{A}) = 2.428 \text{ mA}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{2.428 \text{ mA}} = \mathbf{10.71 \Omega}$$

b. $\beta r_e = (100)(10.71 \Omega) = 1.071 \text{ k}\Omega$

$$Z_i = R_B \parallel \beta r_e = 470 \text{ k}\Omega \parallel 1.071 \text{ k}\Omega = \mathbf{1.07 \text{ k}\Omega}$$

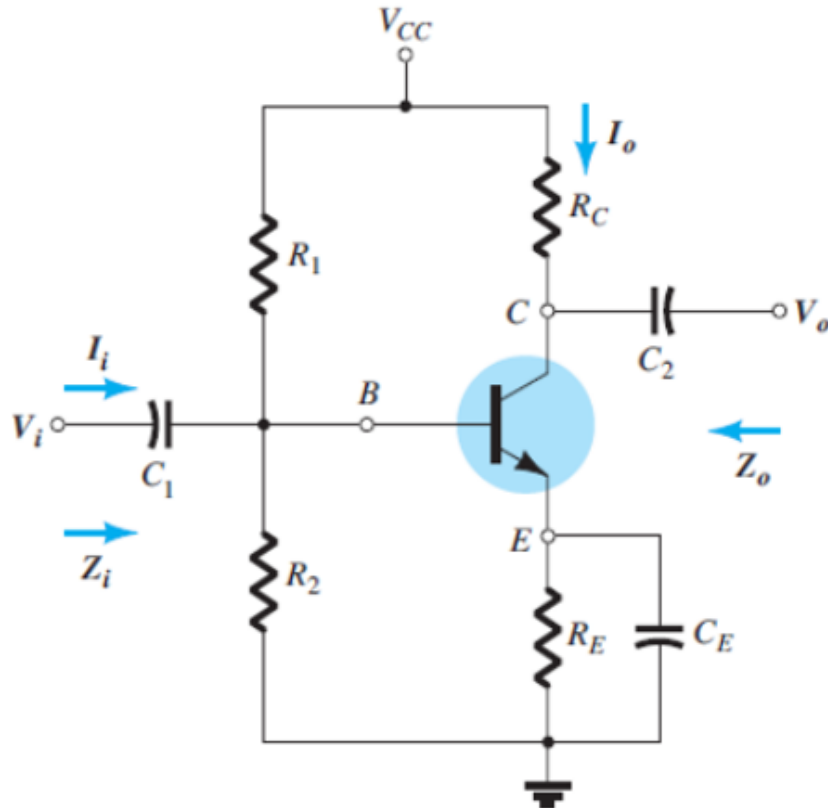
c. $Z_o = R_C = \mathbf{3 \text{ k}\Omega}$

d. $A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{3 \text{ k}\Omega}{10.71 \Omega} = \mathbf{-280.11}$

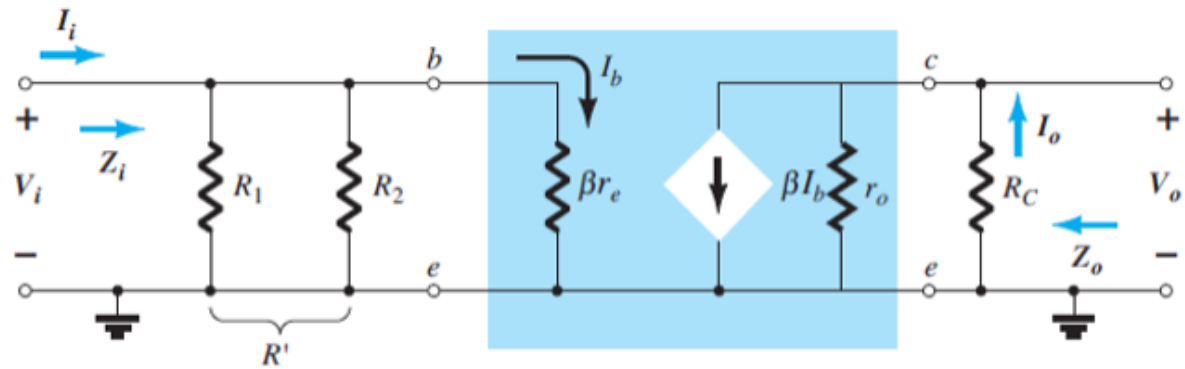
e. $Z_o = r_o \parallel R_C = 50 \text{ k}\Omega \parallel 3 \text{ k}\Omega = \mathbf{2.83 \text{ k}\Omega}$ vs. $3 \text{ k}\Omega$

$$A_v = -\frac{r_o \parallel R_C}{r_e} = \frac{2.83 \text{ k}\Omega}{10.71 \Omega} = \mathbf{-264.24}$$
 vs. -280.11

POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE VOLTAJE



Configuración de polarización por medio del divisor de voltaje.

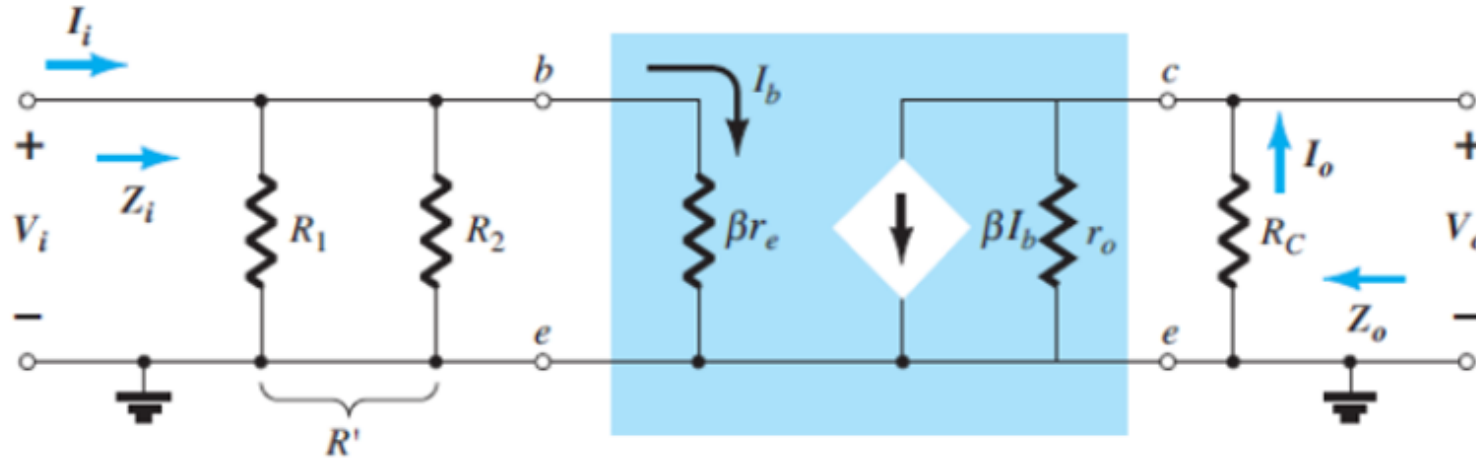


Sustitución del circuito equivalente r_e en la red equivalente de ca

$$R' = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e$$

POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE VOLTAJE



Sustitución del circuito equivalente r_e en la red equivalente de ca

$$Z_o = R_C \parallel r_o$$

$$Z_o \cong R_C$$

$$r_o \geq 10R_C$$

$$V_o = -(\beta I_b)(R_C \parallel r_o)$$

$$I_b = \frac{V_i}{\beta r_e}$$

$$V_o = -\beta \left(\frac{V_i}{\beta r_e} \right) (R_C \parallel r_o)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C \parallel r_o}{r_e}$$

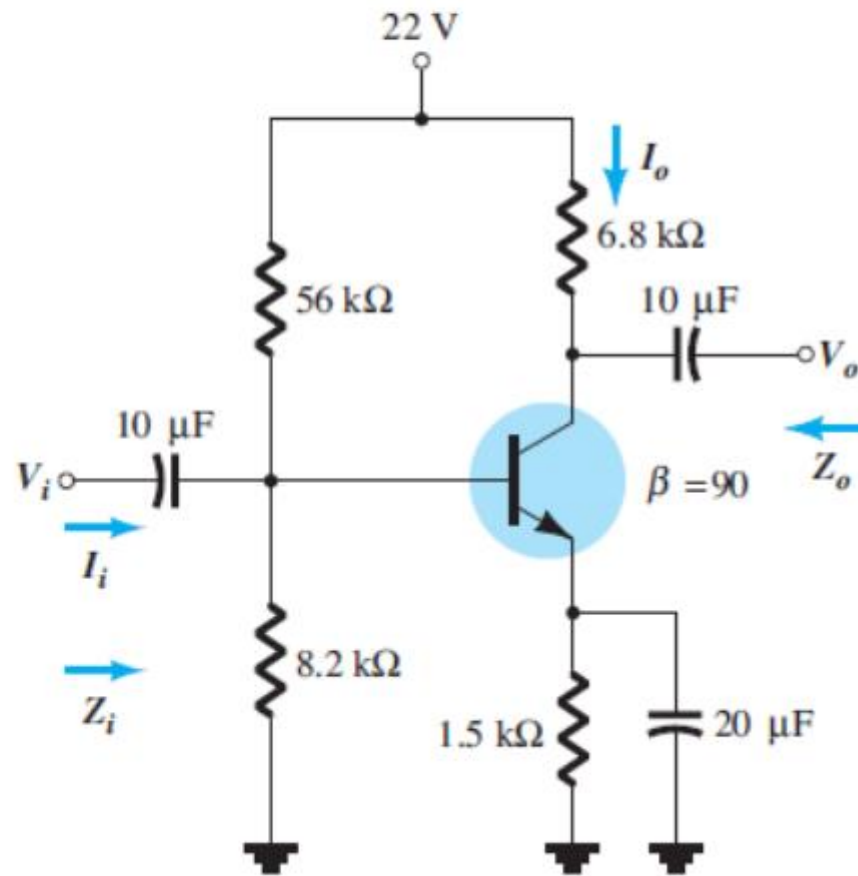
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{r_e}$$

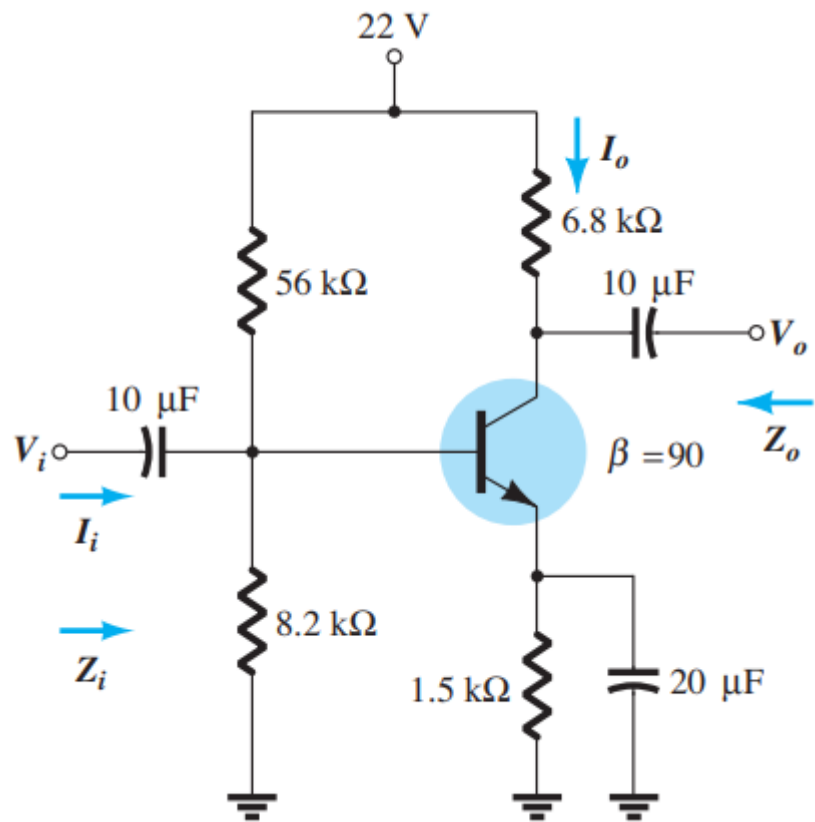
$$r_o \geq 10R_C$$

EJEMPLO

Para la red de la figura determine:

- r_e .
- Z_i .
- $Z_o (r_o = \infty \Omega)$.
- $A_v (r_o = \infty \Omega)$.
- Los parámetros de la partes (b) a (d) si $r_o = 50 \text{ k}\Omega$ y compare los resultados.





a. Cd: Prueba de $\beta R_E > 10R_2$,

$$(90)(1.5 \text{ k}\Omega) > 10(8.2 \text{ k}\Omega)$$

$$135 \text{ k}\Omega > 82 \text{ k}\Omega \text{ (satisfecha)}$$

Utilizando el método aproximado, obtenemos

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{(8.2 \text{ k}\Omega)(22 \text{ V})}{56 \text{ k}\Omega + 8.2 \text{ k}\Omega} = 2.81 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2.81 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 2.11 \text{ V}$$

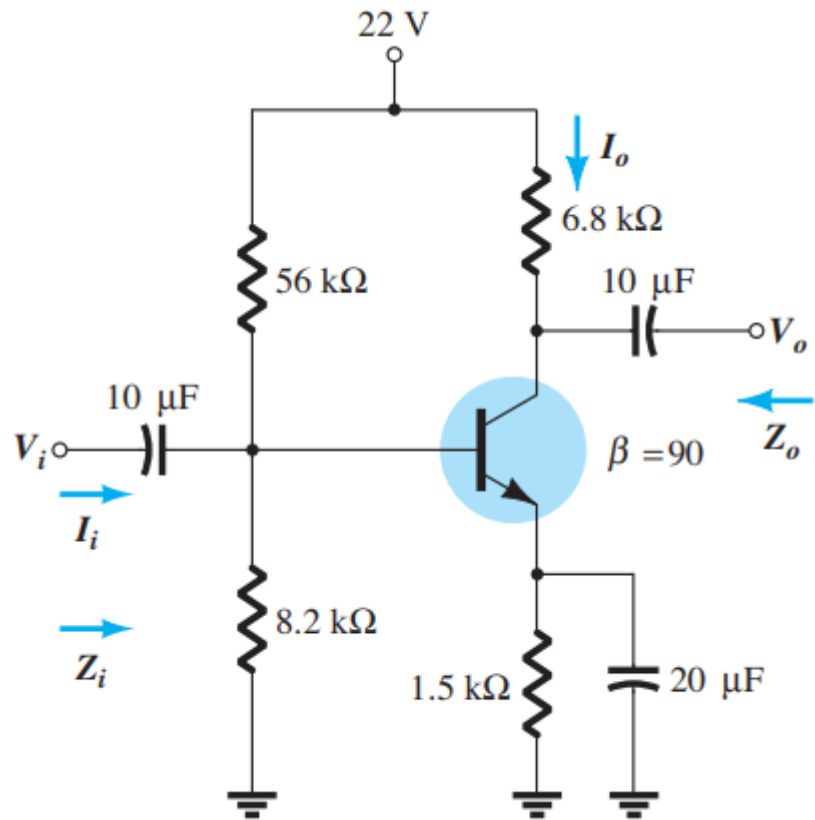
$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{2.11 \text{ V}}{1.5 \text{ k}\Omega} = 1.41 \text{ mA}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{1.41 \text{ mA}} = \mathbf{18.44 \Omega}$$

b. $R' = R_1 \parallel R_2 = (56 \text{ k}\Omega) \parallel (8.2 \text{ k}\Omega) = 7.15 \text{ k}\Omega$

$$Z_i = R' \parallel \beta r_e = 7.15 \text{ k}\Omega \parallel (90)(18.44 \Omega) = 7.15 \text{ k}\Omega \parallel 1.66 \text{ k}\Omega = \mathbf{1.35 \text{ k}\Omega}$$

c. $Z_o = R_C = \mathbf{6.8 \text{ k}\Omega}$



$$d. A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{6.8 \text{ k}\Omega}{18.44 \text{ }\Omega} = \mathbf{-368.76}$$

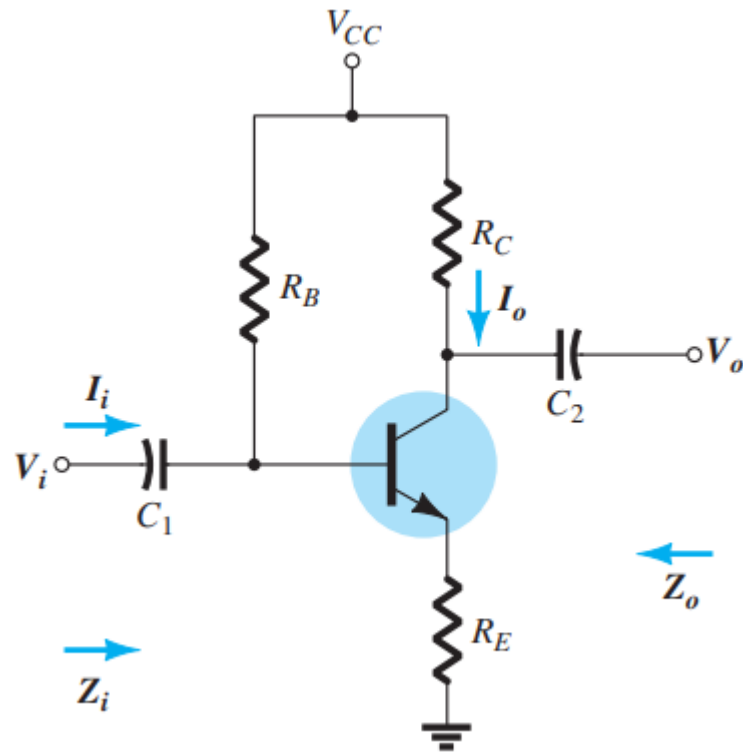
$$e. Z_i = \mathbf{1.35 \text{ k}\Omega}$$

$$Z_o = R_C \parallel r_o = 6.8 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega = \mathbf{5.98 \text{ k}\Omega} \text{ vs. } 6.8 \text{ k}\Omega$$

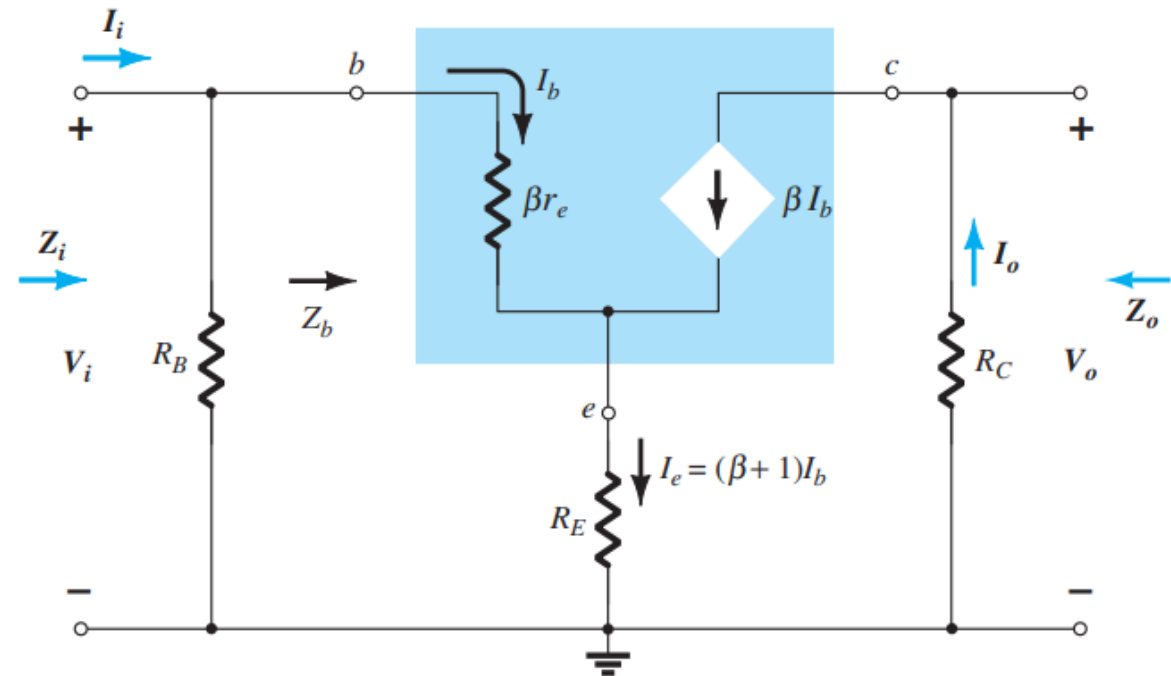
$$A_v = -\frac{R_C \parallel r_o}{r_e} = -\frac{5.98 \text{ k}\Omega}{18.44 \text{ }\Omega} = \mathbf{-324.3} \text{ vs. } -368.76$$

Hay una diferencia entre los resultados de Z_o y A_v , porque no se satisface la condición $r_o \geq 10R_c$

CONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN EN EMISOR COMÚN (Sin Punteo)

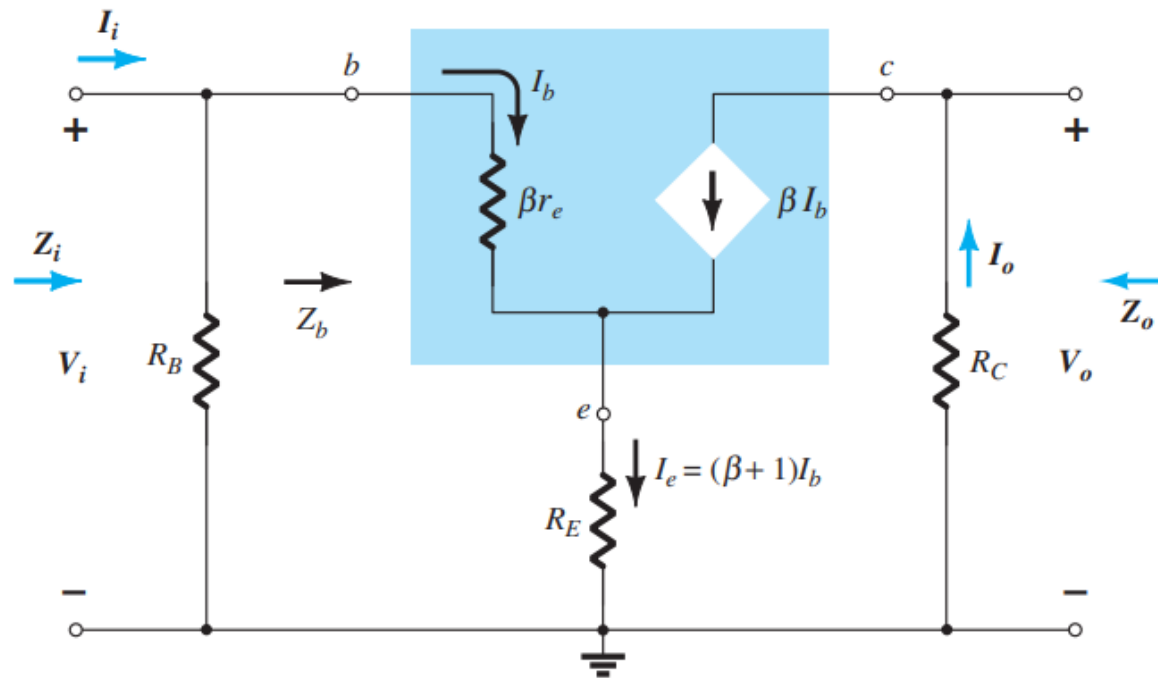


Configuración de polarización en emisor común.



Sustitución del circuito equivalente r_e en la red equivalente de ca.

CONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN EN EMISOR COMÚN (Sin Punteo)

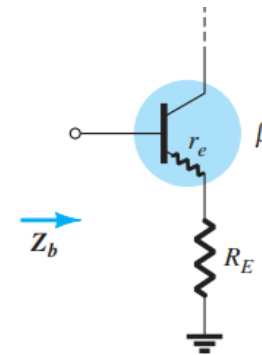


$$V_i = I_b \beta r_e + I_e R_E$$

$$V_i = I_b \beta r_e + (\beta + 1) I_b R_E$$

$$Z_b = \frac{V_i}{I_b} = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

$$Z_b = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$



La ecuación se puede aproximar:

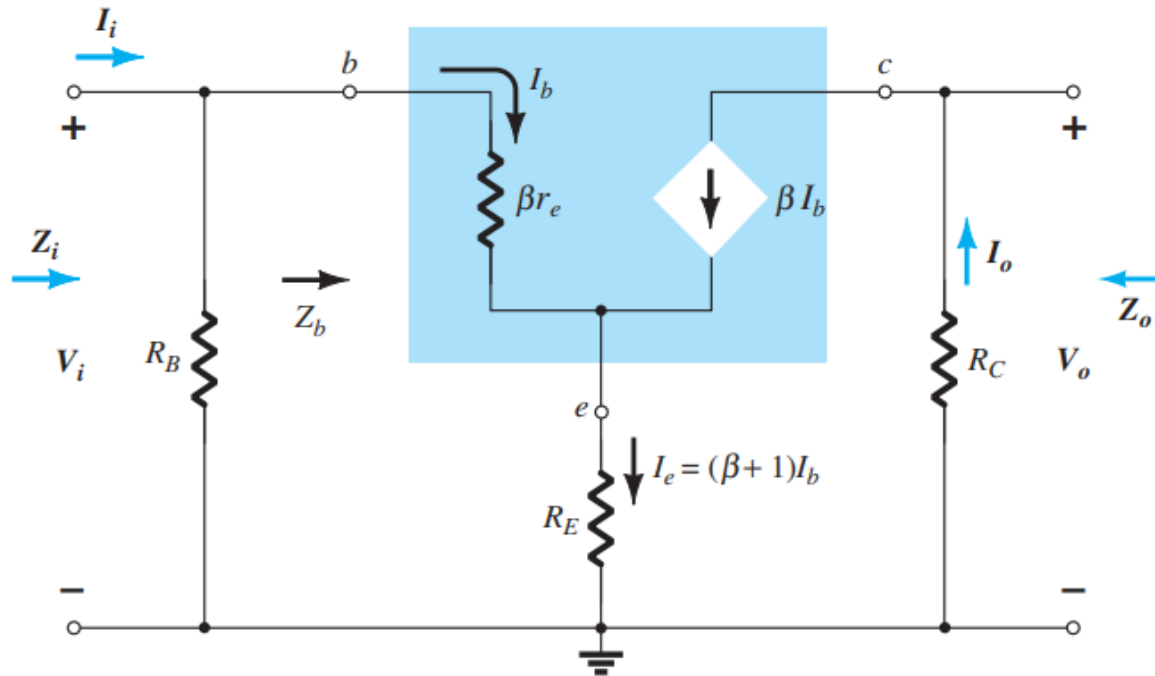
$$Z_b \cong \beta r_e + \beta R_E$$

$$Z_b \cong \beta (r_e + R_E)$$

R_E es mayor a r_e

$$Z_b \cong \beta R_E$$

CONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN EN EMISOR COMÚN (Sin Punteo)



$$Z_i = R_B \parallel Z_b$$

Vi ajustado a cero, $I_b = 0$ y βI_b se reemplaza por un circuito abierto

$$Z_o = R_C$$

Av se tiene:

$$I_b = \frac{V_i}{Z_b}$$

$$\begin{aligned} V_o &= -I_o R_C = -\beta I_b R_C \\ &= -\beta \left(\frac{V_i}{Z_b} \right) R_C \end{aligned}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{\beta R_C}{Z_b}$$

$$Z_b \cong \beta(r_e + R_E)$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{r_e + R_E}$$

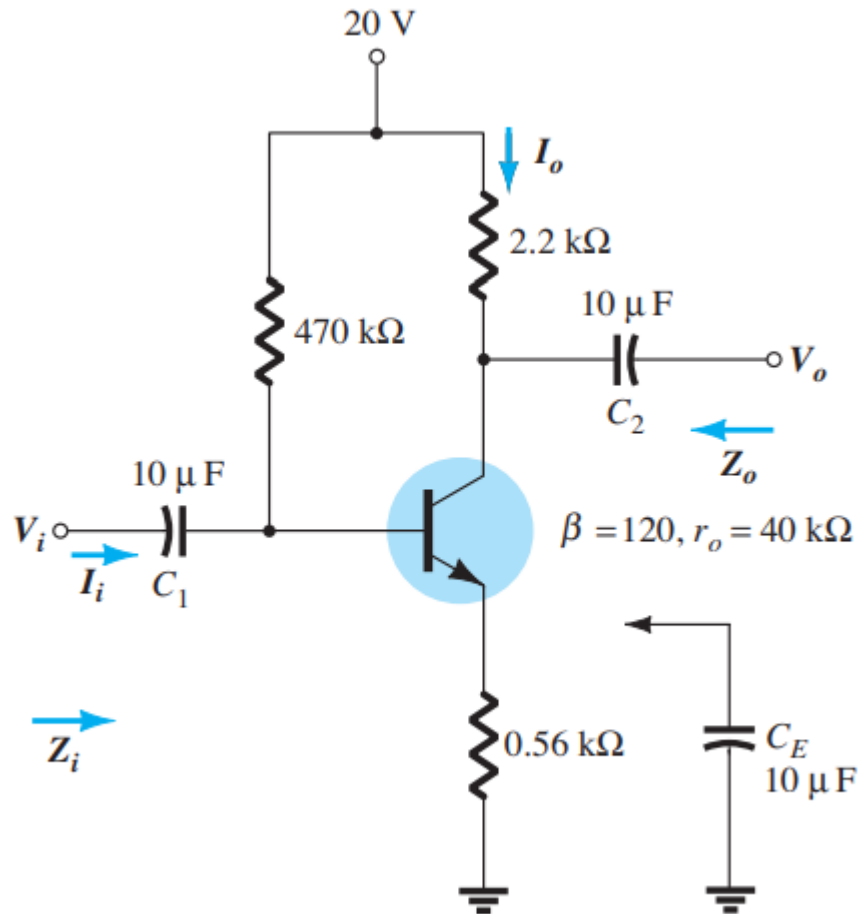
$$Z_b \cong \beta R_E$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{R_E}$$

Ejemplo

Para la red sin C_E (sin puenteo), determine:

- r_e .
- Z_i .
- Z_o .
- A_v .



a. Cd:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{20 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{470 \text{ k}\Omega + (121)0.56 \text{ k}\Omega} = 35.89 \mu\text{A}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = (121)(35.89 \mu\text{A}) = 4.34 \text{ mA}$$

y

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{4.34 \text{ mA}} = \mathbf{5.99 \Omega}$$

b. Sometiendo a prueba la condición $r_o \geq 10(R_C + R_E)$, obtenemos

$$40 \text{ k}\Omega \geq 10(2.2 \text{ k}\Omega + 0.56 \text{ k}\Omega)$$

$$40 \text{ k}\Omega \geq 10(2.76 \text{ k}\Omega) = 27.6 \text{ k}\Omega \text{ (satisfecha)}$$

Por consiguiente,

$$Z_b \cong \beta(r_e + R_E) = 120(5.99 \Omega + 560 \Omega) = 67.92 \text{ k}\Omega$$

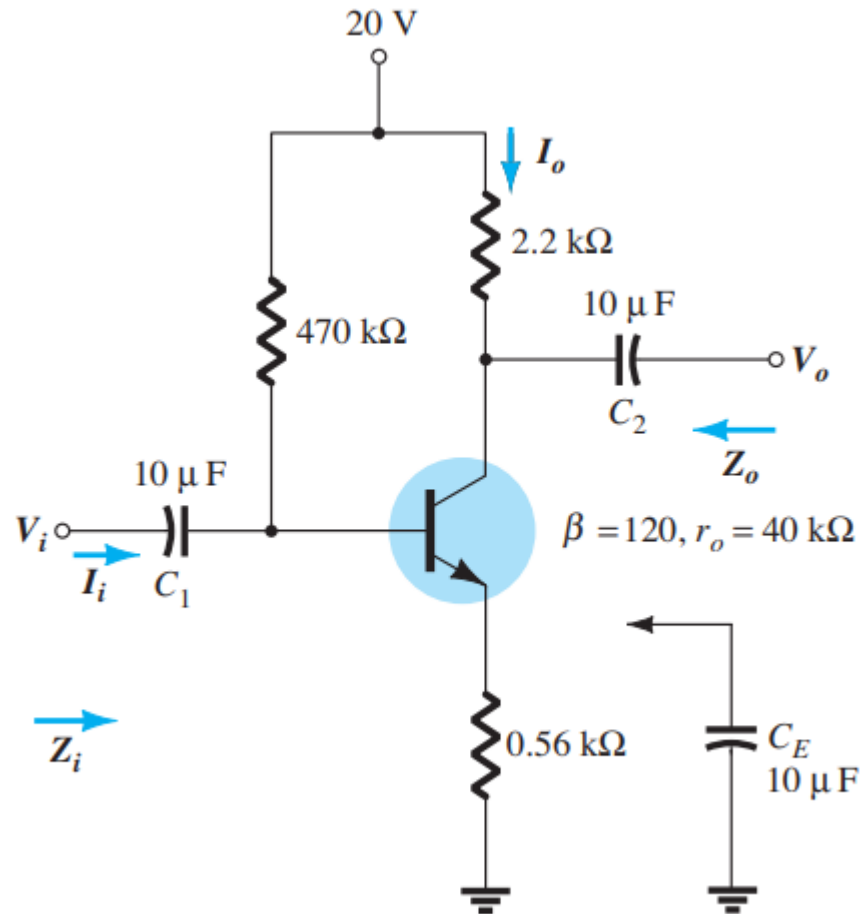
y

$$Z_i = R_B \parallel Z_b = 470 \text{ k}\Omega \parallel 67.92 \text{ k}\Omega = \mathbf{59.34 \text{ k}\Omega}$$

Ejemplo

Para la red sin C_E (sin puenteo), determine:

- a. r_e .
- b. Z_i .
- c. Z_o .
- d. A_v .



c. $Z_o = R_C = \mathbf{2.2\text{ k}\Omega}$

d. $r_o \geq 10R_C$ se satisface. Por consiguiente,

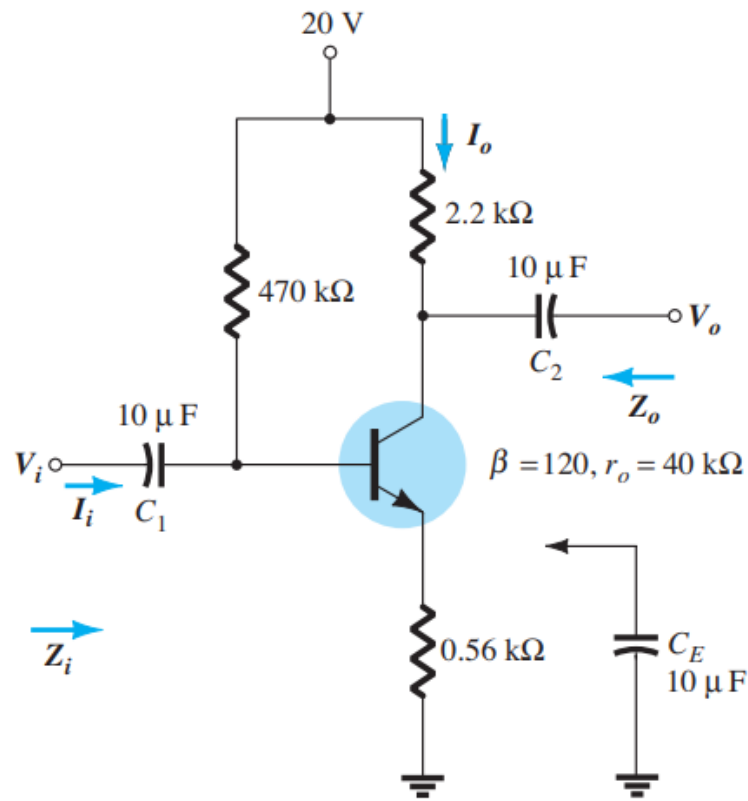
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{\beta R_C}{Z_b} = -\frac{(120)(2.2\text{ k}\Omega)}{67.92\text{ k}\Omega} = \mathbf{-3.89}$$

$$A_v \cong -R_C/R_E = -3.93$$

Ejemplo

Para la red con C_E en su lugar.

- a. r_e .
- b. Z_i .
- c. Z_o .
- d. A_v .



- a. El análisis de cd es el mismo y $r_e = 5.99 \Omega$.
- b. R_E es “puesta en cortocircuito” por C_E para el análisis de ca. Por consiguiente,

$$Z_i = R_B \parallel Z_b = R_B \parallel \beta r_e = 470 \text{ k}\Omega \parallel (120)(5.99 \Omega) \\ = 470 \text{ k}\Omega \parallel 718.8 \Omega \cong \mathbf{717.70 \Omega}$$

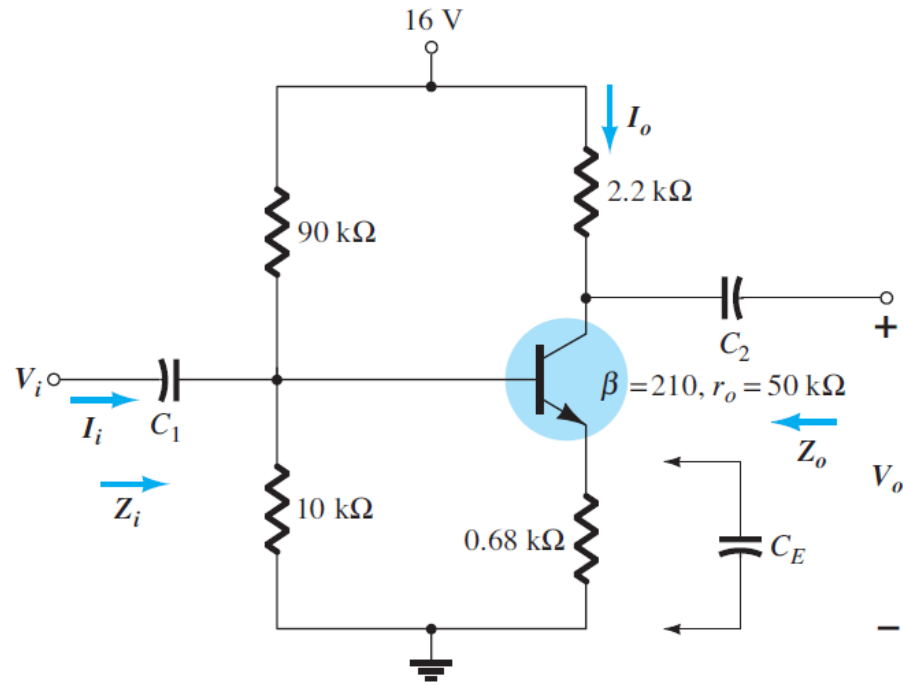
- c. $Z_o = R_C = \mathbf{2.2 \text{ k}\Omega}$

$$\text{d. } A_v = -\frac{R_C}{r_e} \\ = -\frac{2.2 \text{ k}\Omega}{5.99 \Omega} = \mathbf{-367.28} \text{ (un incremento significativo)}$$

Ejemplo

- a. r_e .
- b. Z_i .
- c. Z_o .
- d. A_v .

Para la red sin C_E (sin puenteo), determine:



a. Al comprobar la condición $\beta R_E > 10R_2$,

$$(210)(0.68 \text{ k}\Omega) > 10(10 \text{ k}\Omega)$$

$$142.8 \text{ k}\Omega > 100 \text{ k}\Omega \text{ (satisfecho)}$$

tenemos

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{90 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} (16 \text{ V}) = 1.6 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 1.6 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 0.9 \text{ V}$$

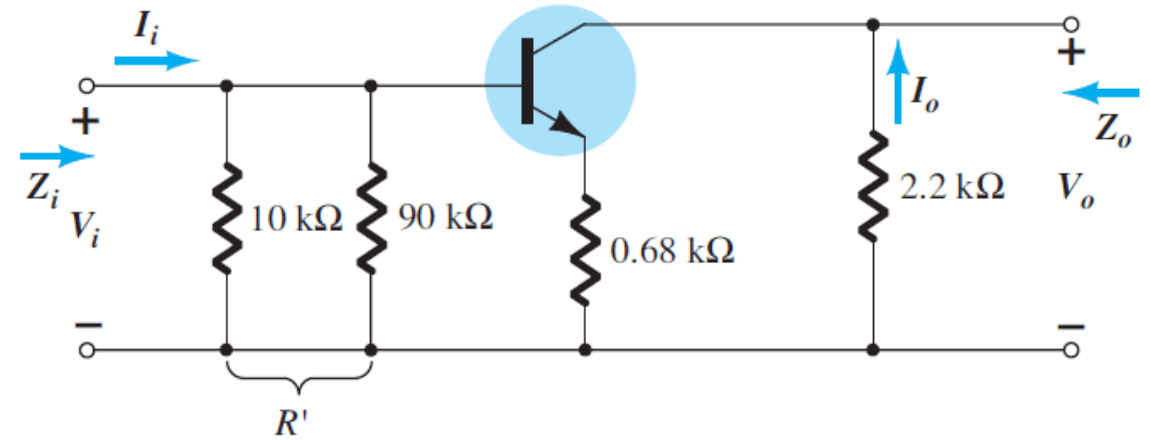
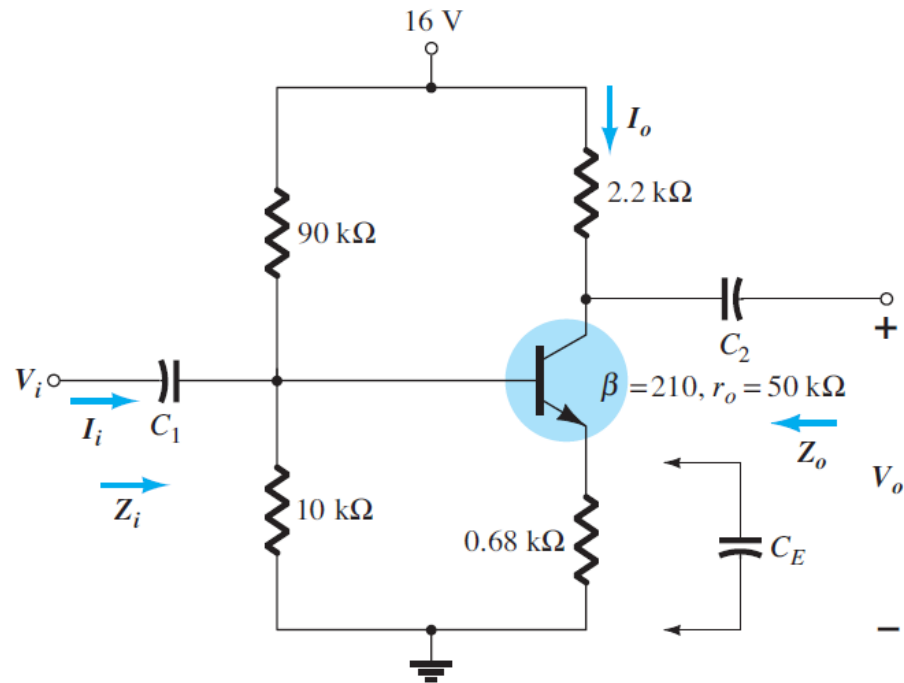
$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{0.9 \text{ V}}{0.68 \text{ k}\Omega} = 1.324 \text{ mA}$$

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{1.324 \text{ mA}} = \mathbf{19.64 \Omega}$$

Ejemplo

Para la red sin C_E (sin puenteo), determine:

- r_e .
- Z_i .
- Z_o .
- A_v .



$$R_B = R' = R_1 \parallel R_2 = 9 \text{ k}\Omega$$

Las condiciones de prueba de $r_o \geq 10(R_C + R_E)$ y $r_o \geq 10R_C$ se satisfacen. Utilizando aproximaciones apropiadas se obtiene

$$Z_b \cong \beta R_E = 142.8 \text{ k}\Omega$$

$$Z_i = R_B \parallel Z_b = 9 \text{ k}\Omega \parallel 142.8 \text{ k}\Omega = 8.47 \text{ k}\Omega$$

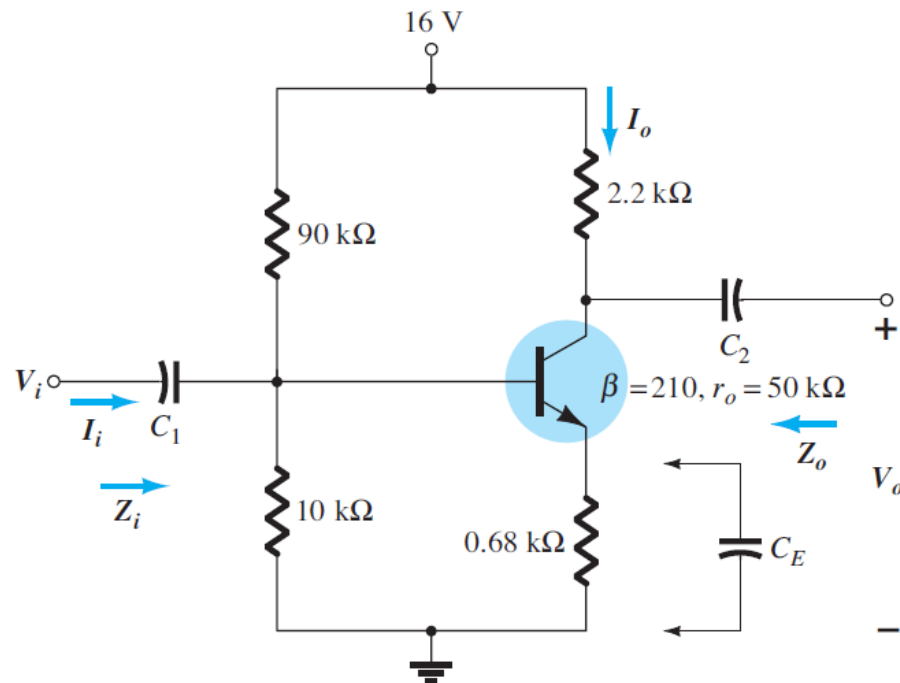
$$\text{c. } Z_o = R_C = 2.2 \text{ k}\Omega$$

$$\text{d. } A_v = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{2.2 \text{ k}\Omega}{0.68 \text{ k}\Omega} = -3.24$$

Ejemplo

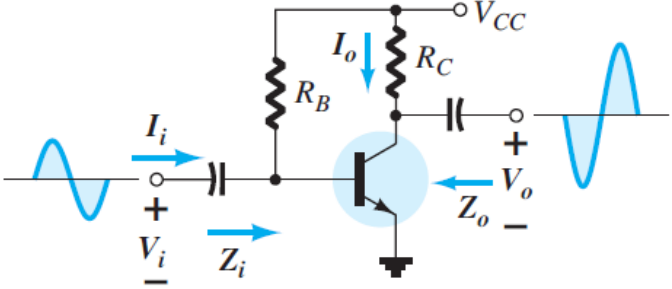
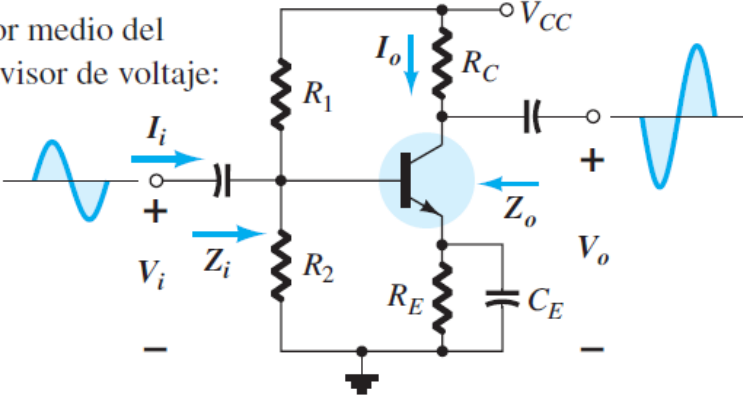
Para la red con C_E en su lugar.

- a. r_e .
- b. Z_i .
- c. Z_o .
- d. A_v .

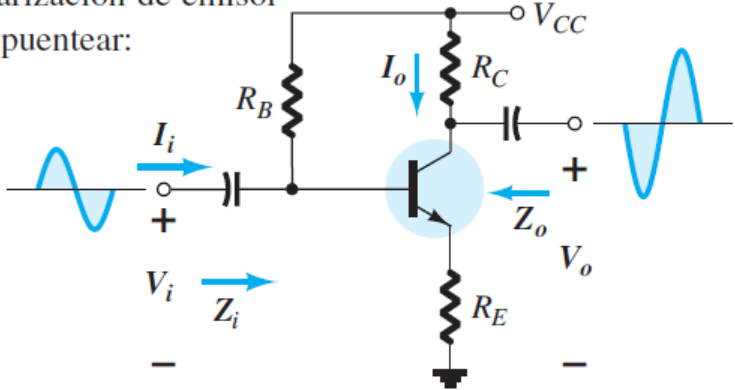


- a. El análisis de cd es el mismo, y $r_e = \mathbf{19.64\ \Omega}$.
- b. $Z_b = \beta r_e = (210)(19.64\ \Omega) \cong 4.12\text{ k}\Omega$
 $Z_i = R_B \parallel Z_b = 9\text{ k}\Omega \parallel 4.12\text{ k}\Omega$
 $= \mathbf{2.83\text{ k}\Omega}$
- c. $Z_o = R_C = \mathbf{2.2\text{ k}\Omega}$
- d. $A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{2.2\text{ k}\Omega}{19.64\ \Omega} = \mathbf{-112.02}$ (un incremento significativo)

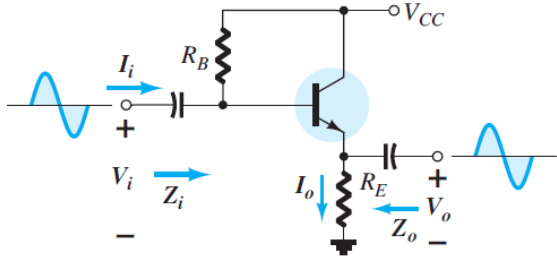
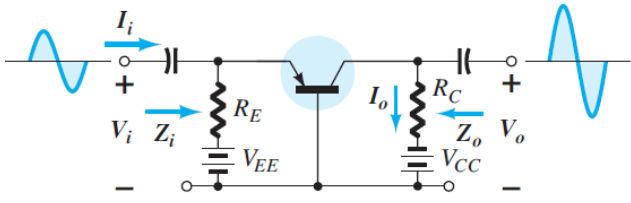
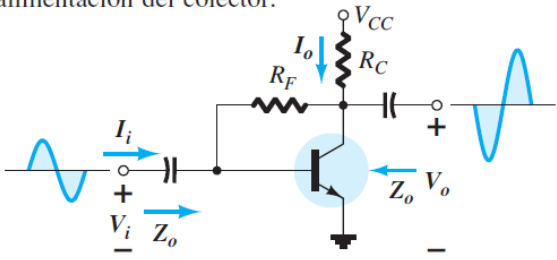
Amplificadores con transistor BJT sin carga

Configuración	Z_i	Z_o	A_v	A_i
<p>Polarización fija:</p> 	<p>Media (1 kΩ)</p> $= R_B \parallel \beta r_e$ $\cong \beta r_e$ <p>($R_B \geq 10\beta r_e$)</p>	<p>Media (2 kΩ)</p> $= R_C \parallel r_o$ $\cong R_C$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Alta (-200)</p> $= -\frac{(R_C \parallel r_o)}{r_e}$ $\cong -\frac{R_C}{r_e}$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Alta (100)</p> $= \frac{\beta R_B r_o}{(r_o + R_C)(R_B + \beta r_e)}$ $\cong \beta$ <p>($r_o \geq 10R_C$, $R_B \geq 10\beta r_e$)</p>
<p>Polarización por medio del divisor de voltaje:</p> 	<p>Media (1 kΩ)</p> $= R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_e$	<p>Media (2 kΩ)</p> $= R_C \parallel r_o$ $\cong R_C$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Alta (-200)</p> $= -\frac{R_C \parallel r_o}{r_e}$ $\cong -\frac{R_C}{r_e}$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Alta (50)</p> $= \frac{\beta (R_1 \parallel R_2) r_o}{(r_o + R_C)(R_1 \parallel R_2 + \beta r_e)}$ $\cong \frac{\beta (R_1 \parallel R_2)}{R_1 \parallel R_2 + \beta r_e}$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>

Amplificadores con transistor BJT sin carga

Configuración	Z_i	Z_o	A_v	A_i
<p>Polarización de emisor sin puentear:</p> 	<p>Alta ($100\text{ k}\Omega$)</p> $= R_B \parallel Z_b$ $Z_b \cong \beta(r_e + R_E)$ $\cong R_B \parallel \beta R_E$ <p>$(R_E \gg r_e)$</p>	<p>Media ($2\text{ k}\Omega$)</p> $= R_C$ <p>(cualquier nivel de r_o)</p>	<p>Baja (-5)</p> $= -\frac{R_C}{r_e + R_E}$ $\cong -\frac{R_C}{R_E}$ <p>$(R_E \gg r_e)$</p>	<p>Alta (50)</p> $\cong -\frac{\beta R_B}{R_B + Z_b}$

Amplificadores con transistor BJT sin carga

Configuración	Z_i	Z_o	A_v	A_i
<p>Emisor seguidor:</p> 	<p>Alta (100 kΩ)</p> $= R_B \parallel Z_b$ $Z_b \cong \beta(r_e + R_E)$ $\cong R_B \parallel \beta R_E$ <p>($R_E \gg r_e$)</p>	<p>Baja (20 kΩ)</p> $= R_E \parallel r_e$ $\cong r_e$ <p>($R_E \gg r_e$)</p>	<p>Baja ($\cong 1$)</p> $= \frac{R_E}{R_E + r_e}$ $\cong 1$	<p>Alta (-50)</p> $\cong -\frac{\beta R_B}{R_B + Z_b}$
<p>Base común:</p> 	<p>Baja (20 Ω)</p> $= R_E \parallel r_e$ $\cong r_e$ <p>($R_E \gg r_e$)</p>	<p>Media (2 kΩ)</p> $= R_C$	<p>Alta (200)</p> $\cong \frac{R_C}{r_e}$	<p>Baja (-1)</p> $\cong -1$
<p>Realimentación del colector:</p> 	<p>Media (1 kΩ)</p> $= \frac{r_e}{\frac{1}{\beta} + \frac{R_C}{R_F}}$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Media (2 kΩ)</p> $\cong R_C \parallel R_F$ <p>($r_o \geq 10R_C$)</p>	<p>Alta (-200)</p> $\cong -\frac{R_C}{r_e}$ <p>($r_o \geq 10R_C$) ($R_F \gg R_C$)</p>	<p>Alta (50)</p> $= \frac{\beta R_F}{R_F + \beta R_C}$ $\cong \frac{R_F}{R_C}$