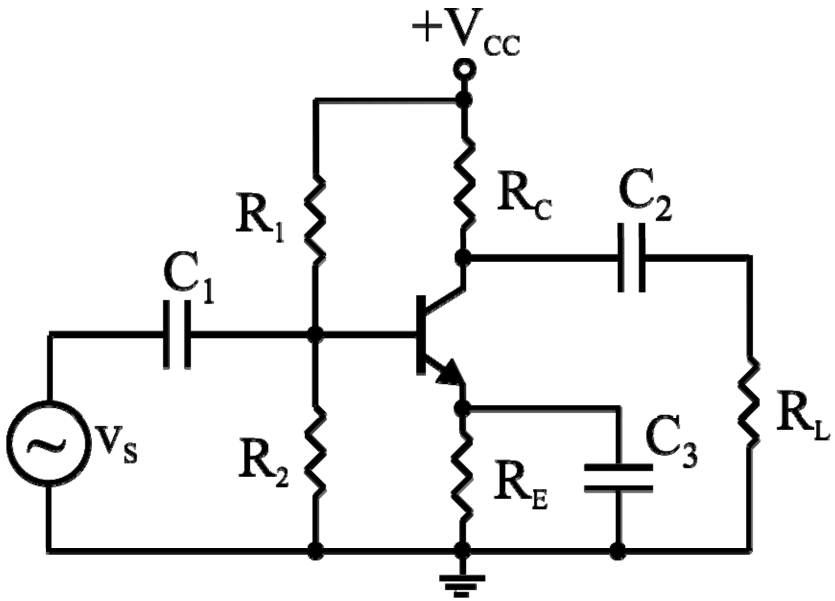
AMPLIFICADORES CON BJT

1.- Introducción.

2.- Modelo de pequeña señal del BJT.

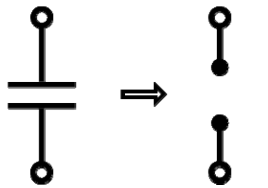
- **2.1.-** El cuadripolo y el modelo híbrido.
- **2.2.-** Modelo híbrido de un transistor.
- **2.3.-** Análisis de un circuito amplificador a transistores empleando parámetro h.
- **2.4.-** Cálculo gráfico de los parámetros h.
- **2.5.-** Modelo híbrido simplificado.
- **2.6.-** Comparación de las distintas configuraciones.

1.- Introducción.

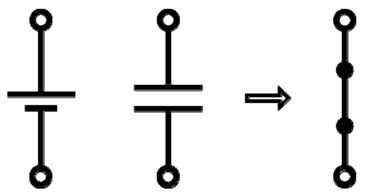


Principio de superposición

Análisis en continua

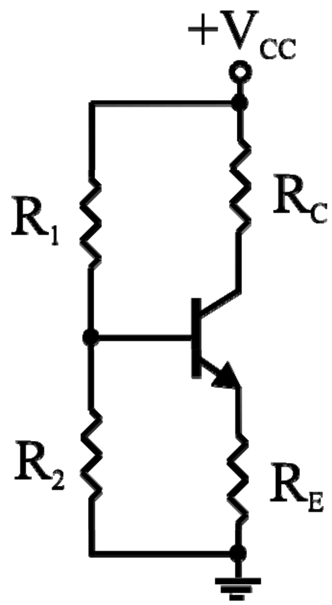


Análisis en alterna

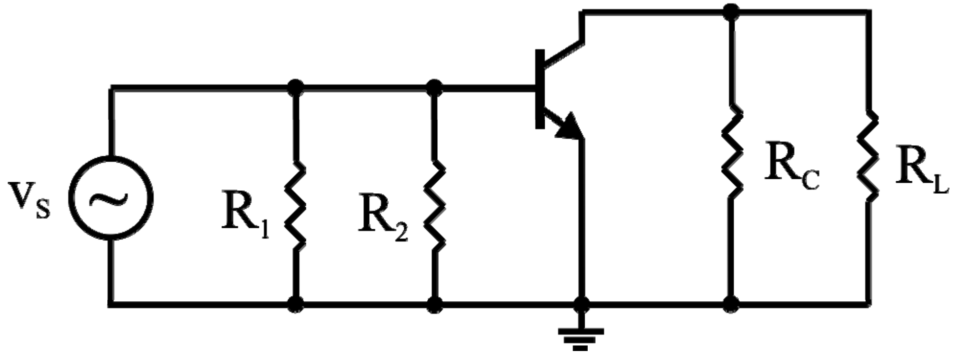


1.- Introducción.

Circuito equivalente DC.



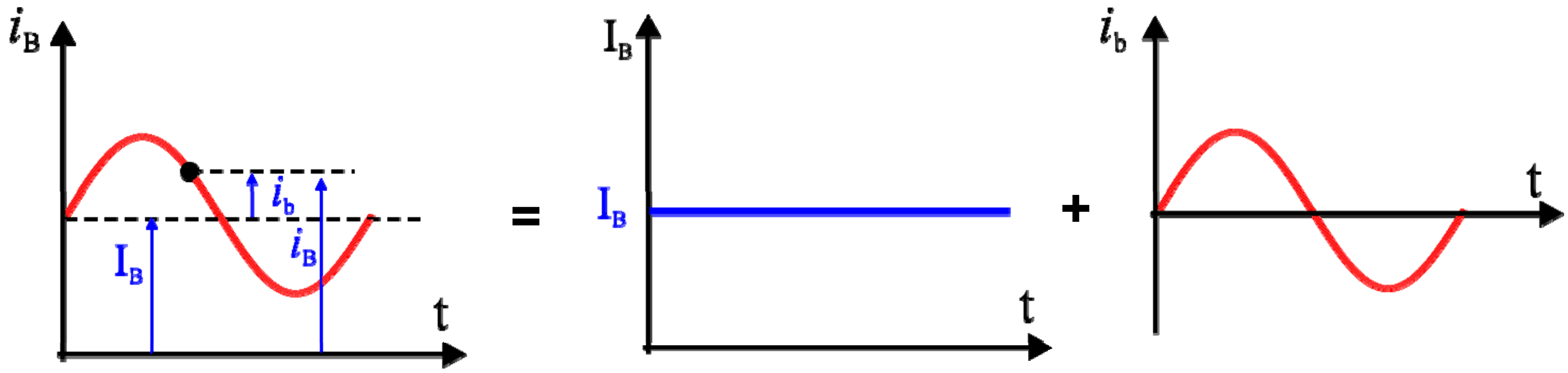
Circuito equivalente AC.



1.- Introducción.

Nomenclatura

$$\boxed{i_B = I_B + i_b}$$



i_B = Valor instantáneo total

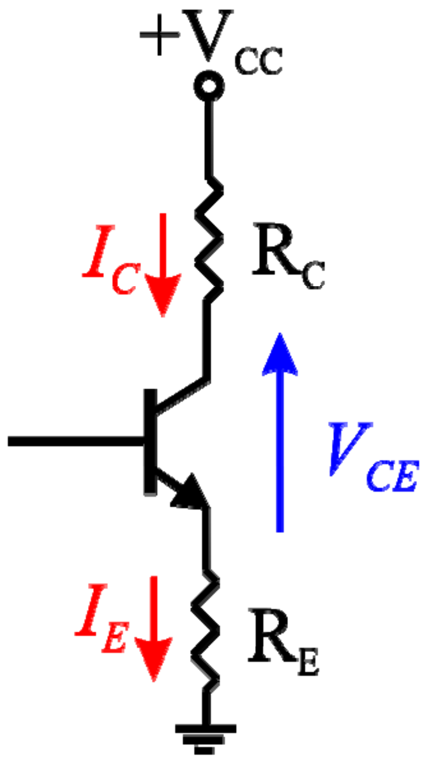
i_b = Componente alterna

I_B = Componente continua

I_b = Valor eficaz de la componente alterna

Recta de Carga Estática

$$\boxed{f\left(V_{CE}, I_C\right) = 0}$$



Análisis de la malla de salida en continua

$$V_{CC} = R_E \cdot I_E + V_{CE} + R_C \cdot I_C$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} \cdot I_C$$

$$\boxed{V_{CC} = \left(R_C + R_E \frac{\beta + 1}{\beta}\right) \cdot I_C + V_{CE}}$$

Si $\beta >> 1$ o β es desconocida

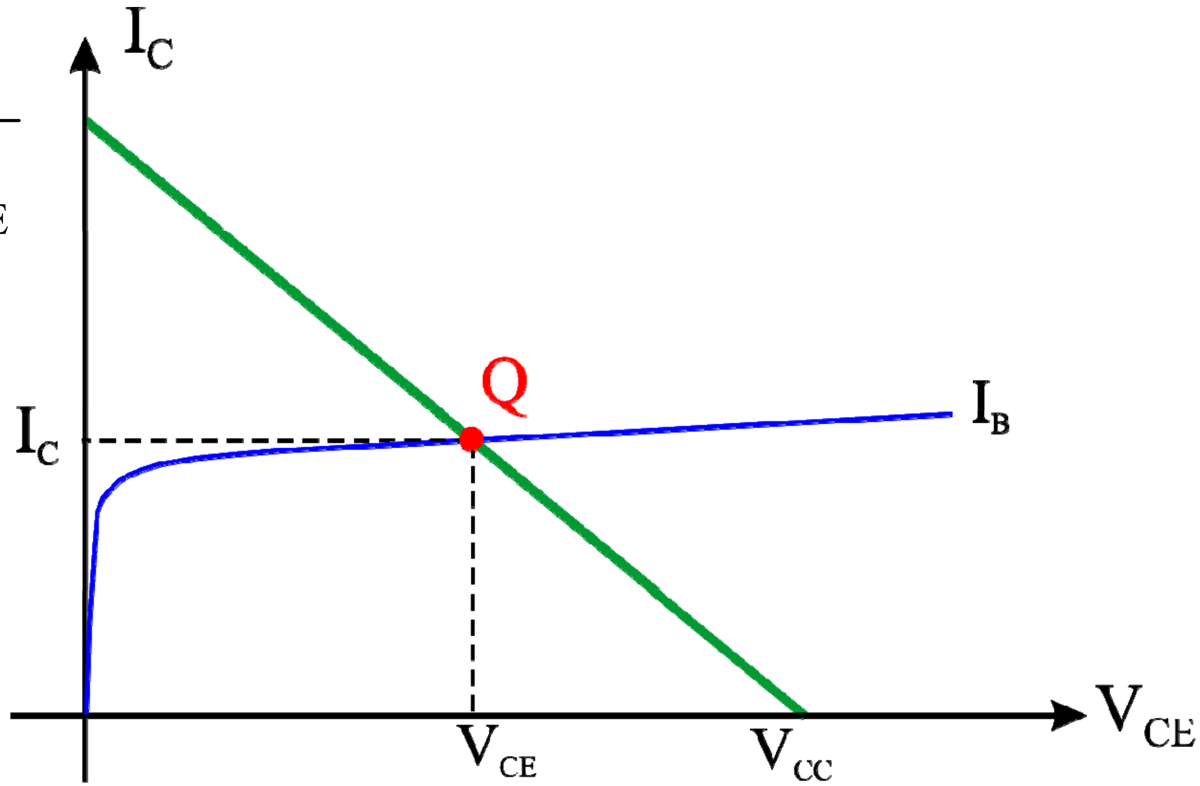
$$\boxed{V_{CC} = \left(R_C + R_E\right) \cdot I_C + V_{CE}}$$

1.- Introducción.

Recta de Carga Estática

Representa los infinitos puntos de funcionamiento puede tener el transistor en el circuito.

$$\frac{V_{CC}}{R_C + \frac{\beta+1}{\beta} R_E}$$

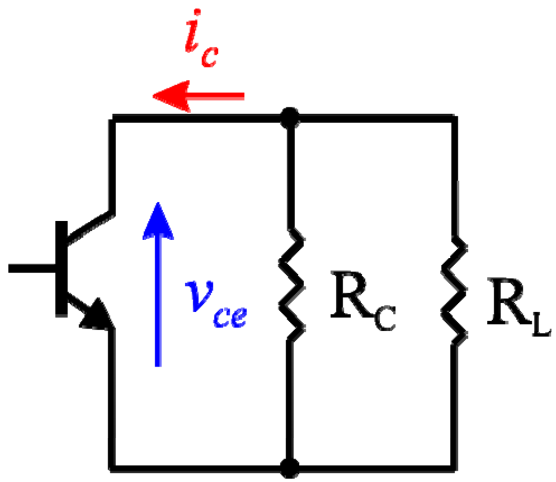


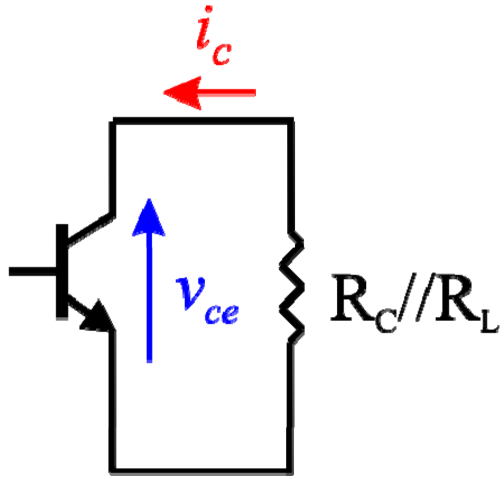
$$m = \frac{-1}{R_C + \frac{\beta+1}{\beta} R_E} \approx \frac{-1}{R_C + R_E}$$

Recta de Carga Dinámica

Análisis de la malla de salida en alterna

$$\boxed{f\left(v_{CE}, i_C\right) = 0}$$



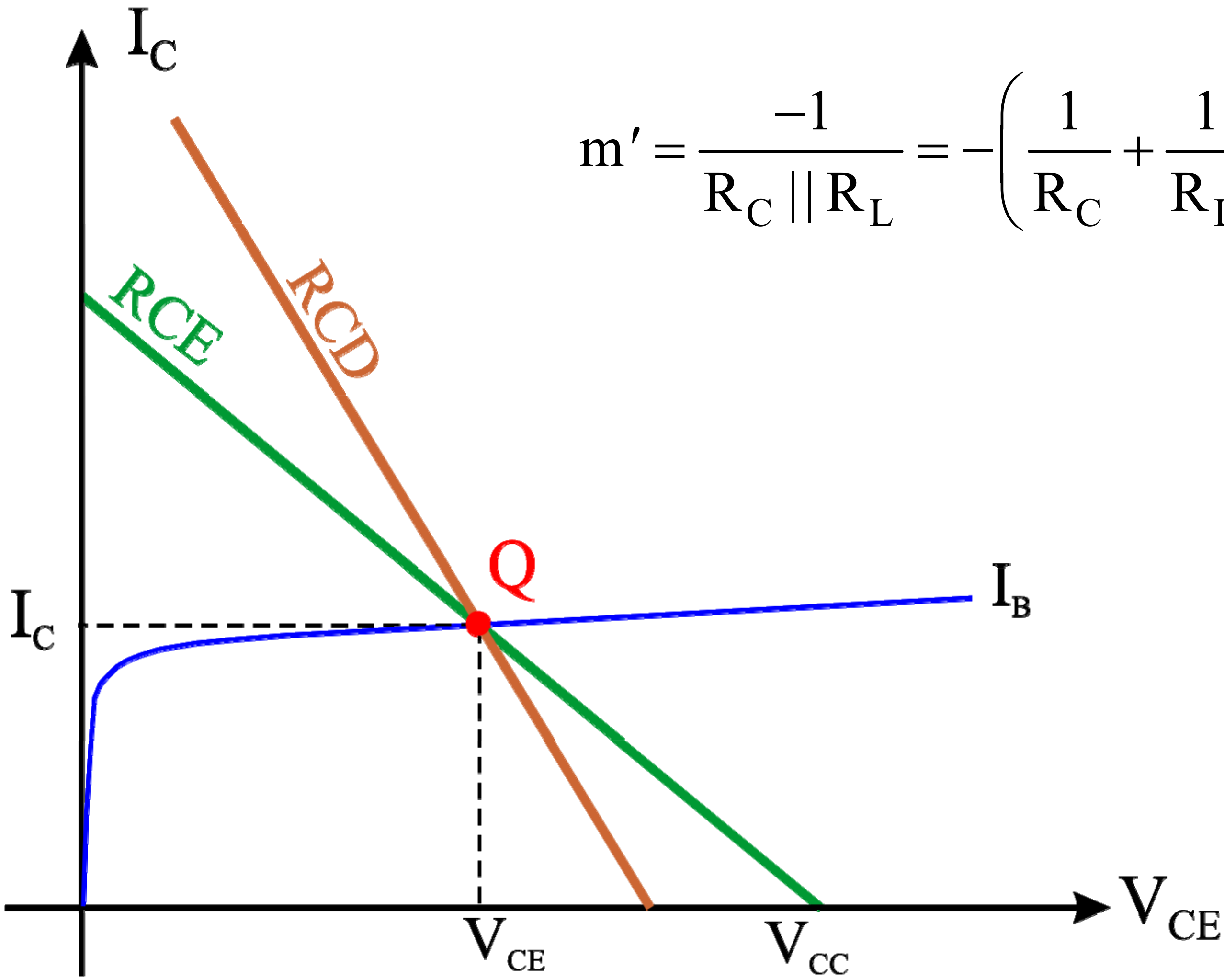


$$i_c = -\frac{v_{ce}}{R_L \,||\, R_C}$$

$$\left.\begin{array}{lll} i_C = I_C + i_c & \Rightarrow & i_c = i_C - I_C \\ v_{CE} = V_{CE} + v_{ce} & \Rightarrow & v_{ce} = v_{CE} - V_{CE} \end{array}\right\}$$

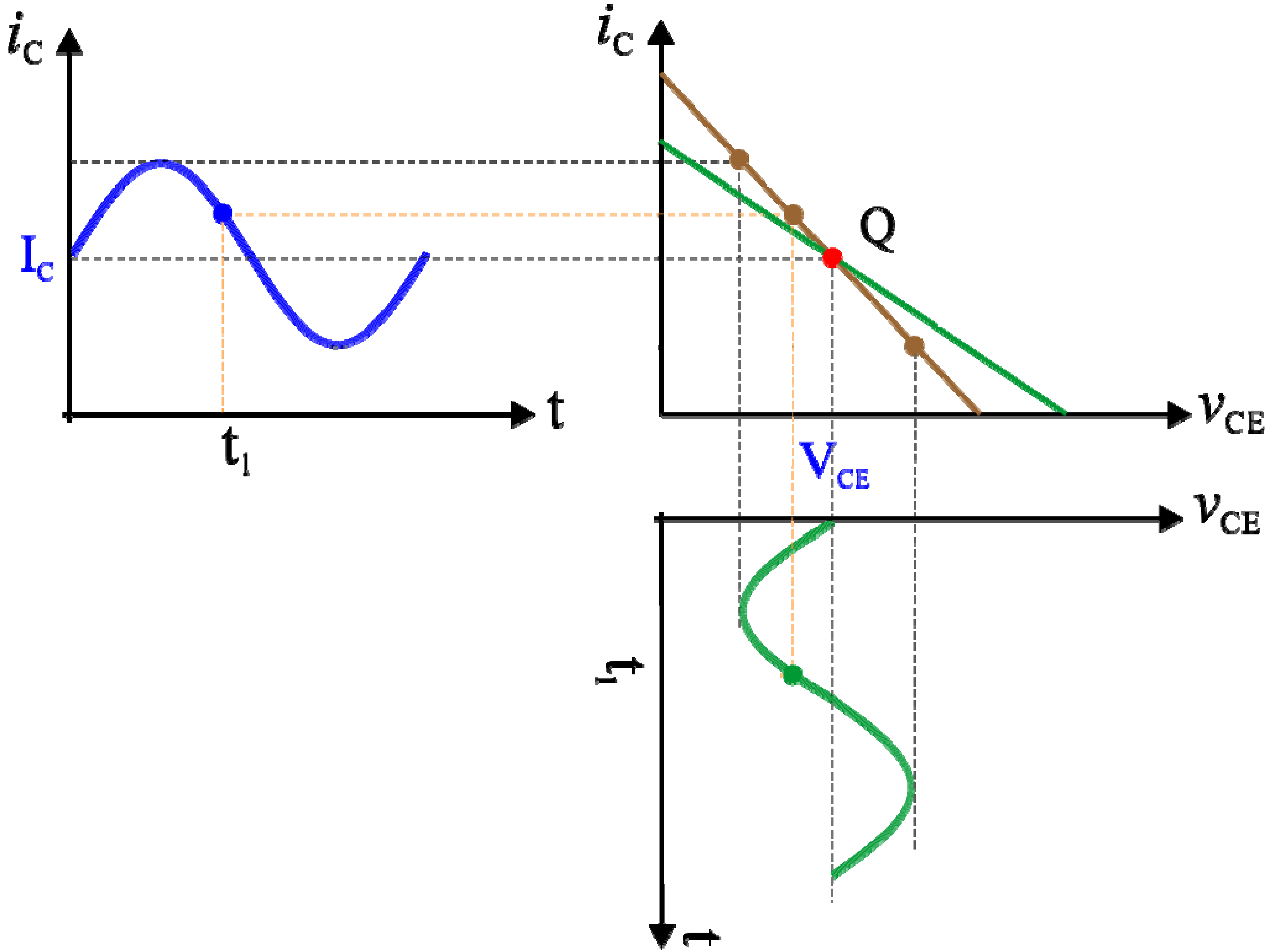
$$\boxed{\left(i_C - I_C\right) = -\frac{1}{R_C \,||\, R_L}\left(v_{CE} - V_{CE}\right)}$$

$$m = \frac{-1}{R_C + R_E}$$

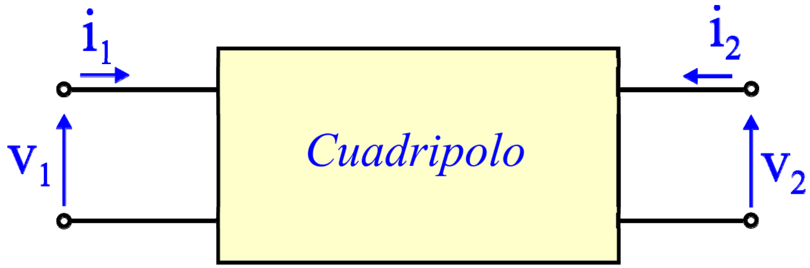


$$m' = \frac{-1}{R_C \,||\, R_L} = -\left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_L}\right)$$

La RCD tiene mayor pendiente que la RCE


i_C
I_C
t
t_1
i_C
Q
v_{CE}
V_{CE}
v_{CE}
t_1
t

2.1.- El cuadripolo y el modelo híbrido.



$$\left.\begin{aligned} v_1 &= h_{11}\cdot i_1 + h_{12}\cdot v_2 \\ i_2 &= h_{21}\cdot i_1 + h_{22}\cdot v_2 \end{aligned}\right\}$$

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{Bmatrix} = \left[h_{ij}\right]\cdot\begin{Bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{Bmatrix}$$

$$h_{11} = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0}$$

Resistencia de entrada
con la salida en cortocircuito (Ω)

$$h_{12} = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0}$$

Amplificación inversa de tensión
con la entrada en circuito abierto (Adimensional)

$$h_{21} = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}$$

Ganancia de corriente
con la salida en cortocircuito (Adimensional)

$$h_{22} = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0}$$

Conductancia de salida
con la entrada en circuito abierto (Ω^{-1})

2.1.- El cuadripolo y el modelo híbrido.

Según las normas de IEEE

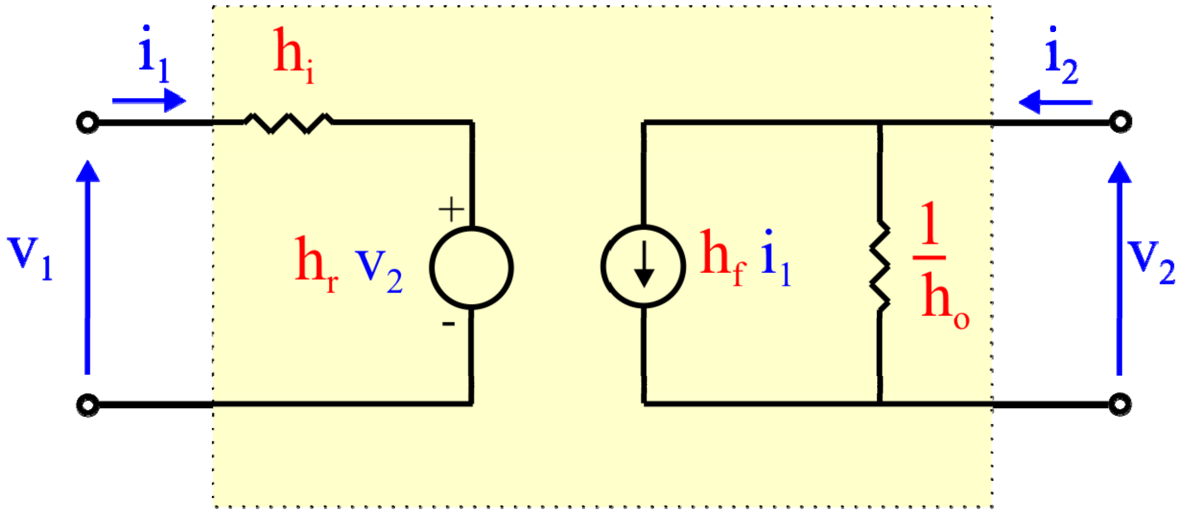
11 = i → Entrada

21 = f → Transferencia directa

12 = r → Transferencia inversa

22 = o → Salida

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= h_i \cdot i_1 + h_r \cdot v_2 \\ i_2 &= h_f \cdot i_1 + h_o \cdot v_2 \end{aligned}\right\}$$



En el caso particular del transistor a los subíndices de los parámetros h se les añadirá una letra (e, b o c) indicativo del tipo de configuración

2.2.- Modelo híbrido de un transistor.

Suponiendo variaciones pequeñas en el entorno del pto Q (parámetros ctes)

Para la configuración de EC

$$v_{BE} = f_1\left(i_B, v_{CE}\right)$$

$$i_C = f_2\left(i_B, v_{CE}\right)$$

Desarrollando en series de Taylor en torno al pto Q y despreciando términos de orden superior

$$\Delta v_{BE} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} \cdot \Delta i_B + \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} \cdot \Delta v_{CE}$$

$$\Delta i_C = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} \cdot \Delta i_B + \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} \cdot \Delta v_{CE}$$

2.2.- Modelo híbrido de un transistor.

$$\Delta v_{BE} = v_{be} \qquad \Delta i_B = i_b$$

$$\Delta v_{CE} = v_{ce} \qquad \Delta i_C = i_c$$

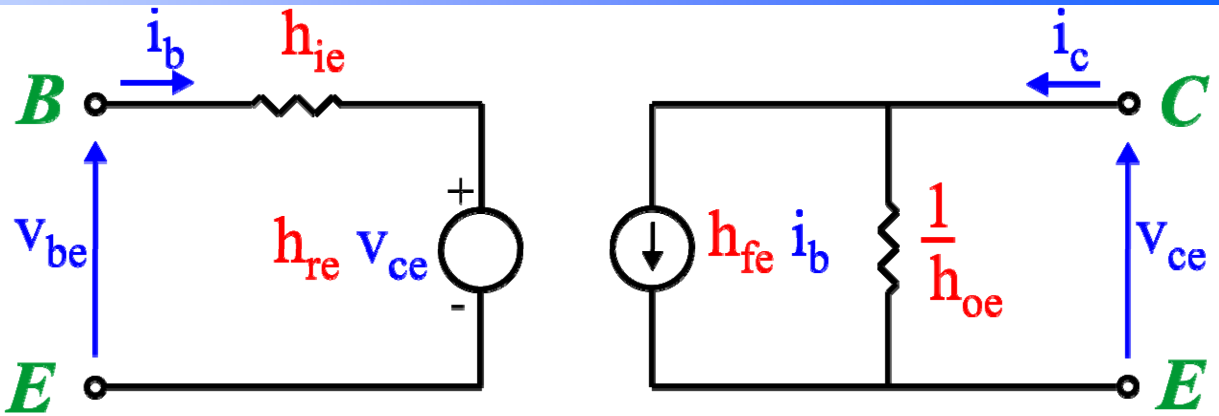
$$h_{ie} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} \qquad h_{re} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}}$$

$$h_{fe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} \qquad h_{oe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}}$$

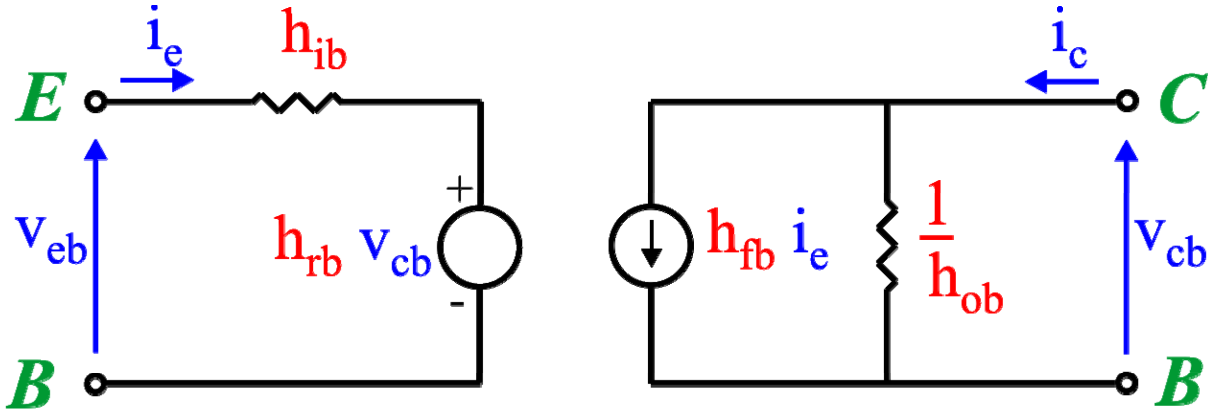
$$\boxed{\left.\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot v_{ce} \\ i_c &= h_{fe} \cdot i_b + h_{oe} \cdot v_{ce} \end{aligned}\right\}}$$

2.2.- Modelo híbrido de un transistor.

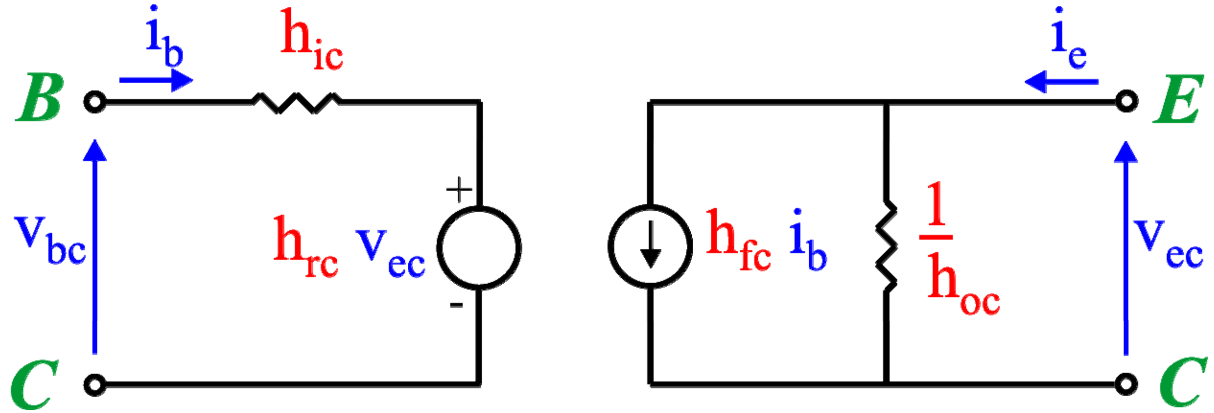
Emisor Común



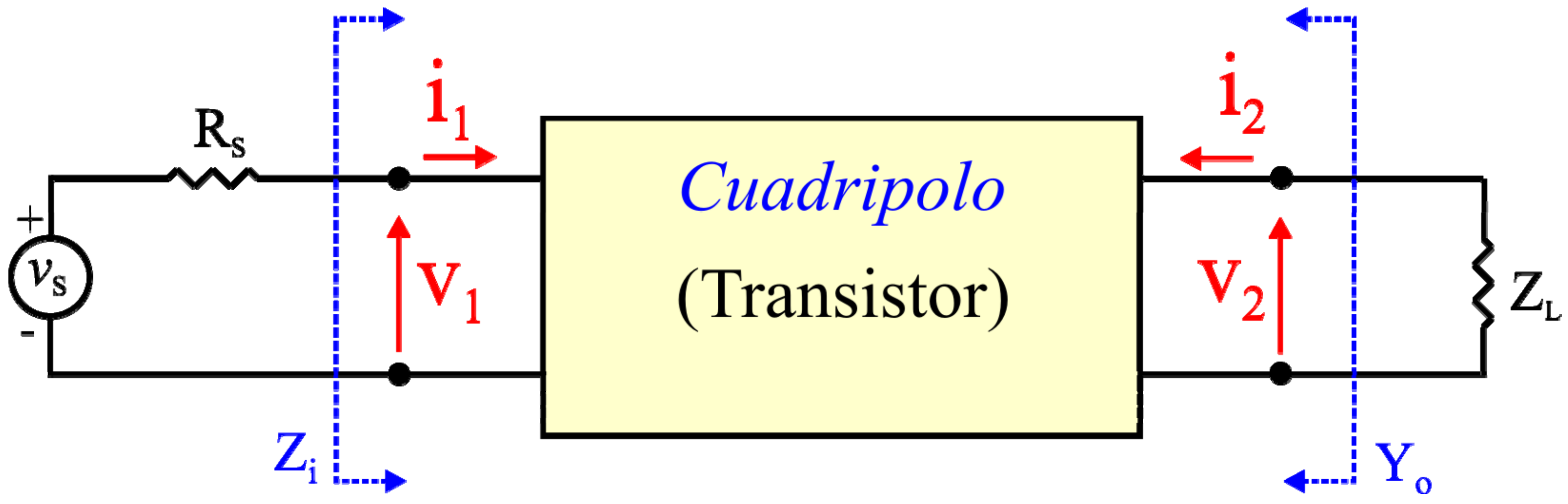
Base Común

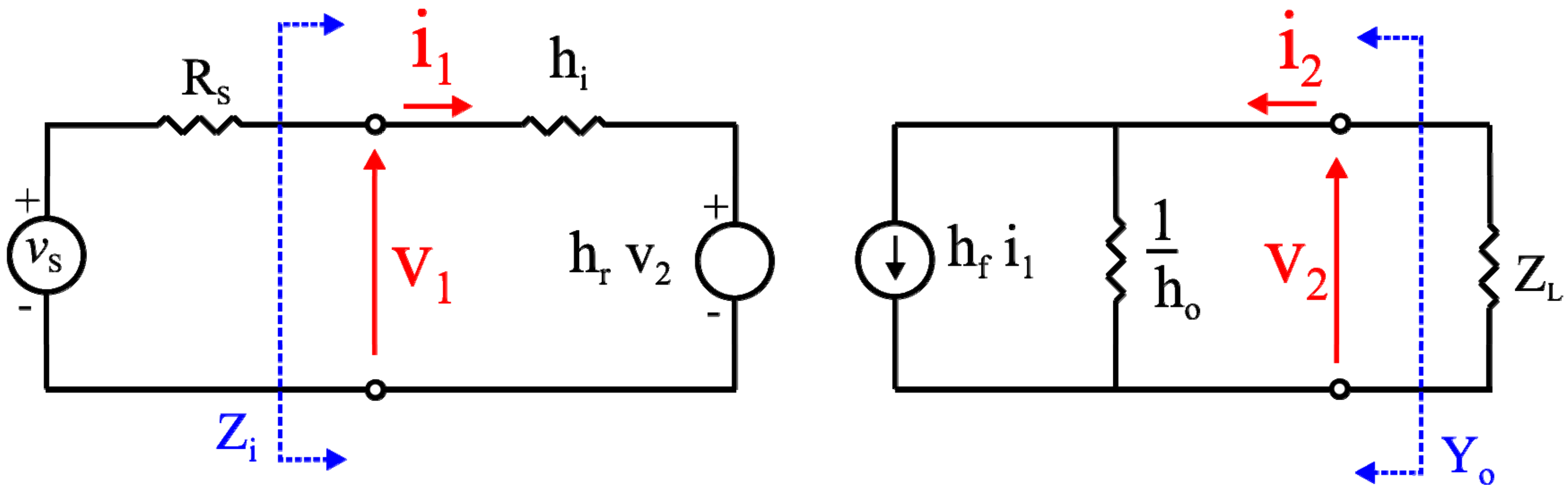


Colector Común



2.3.- Análisis de un circuito amplif. con parámetros híbridos.





2.3.- Análisis de un circuito amplif. con parámetros híbridos.

Ganancia de corriente

$$A_I = \frac{i_L}{i_1} = -\frac{h_f}{1 + h_o \cdot Z_L}$$

Impedancia de entrada

$$Z_i = \frac{v_1}{i_1} = h_i - \frac{h_f \cdot h_r}{\dfrac{1}{Z_L} + h_o}$$

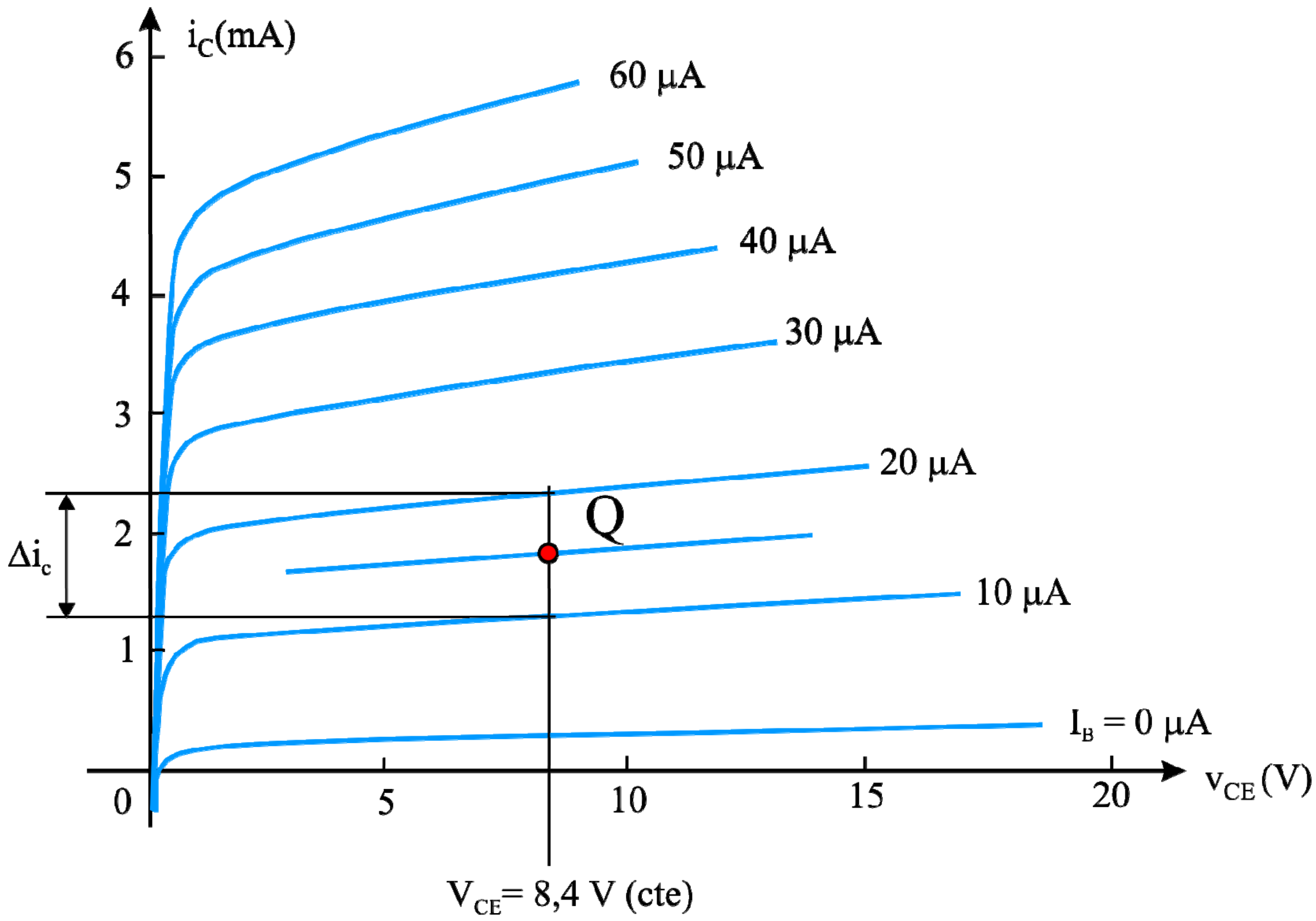
Ganancia de tensión

$$A_V = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A_I}{Z_i} \cdot Z_L \qquad A_{VS} = \frac{v_2}{v_S} = \frac{A_V \cdot Z_i}{Z_i + R_S} = \frac{A_I \cdot Z_L}{Z_i + R_S}$$

Impedancia de salida

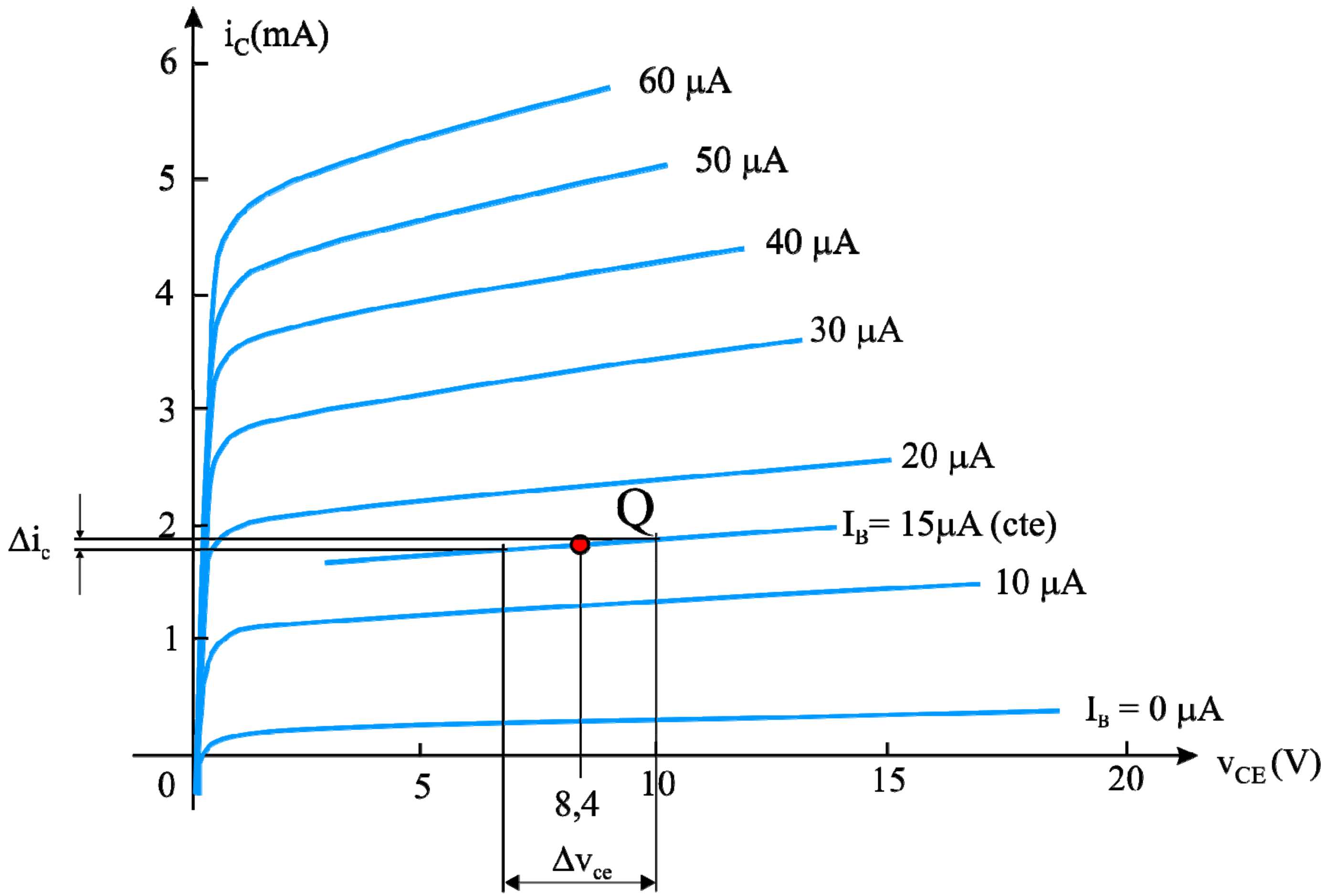
$$Y_o = \frac{i_2}{v_2} = h_o - \frac{h_f \cdot h_r}{h_i + R_S}$$

2.4.- Determinación gráfica de los parámetros h.



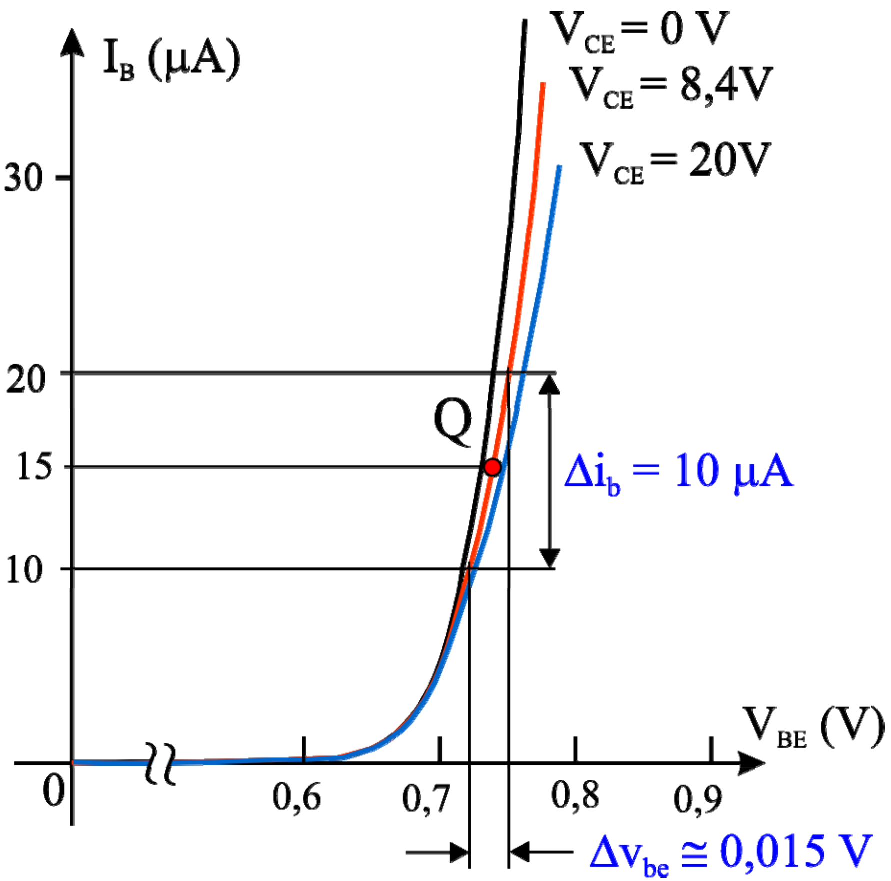
$$h_{fe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} \approx \left.\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} = \frac{(2{,}3-1{,}3)\,\mathrm{mA}}{(20-10)\,\mu\mathrm{A}} = 100$$

2.4.- Determinación gráfica de los parámetros h.



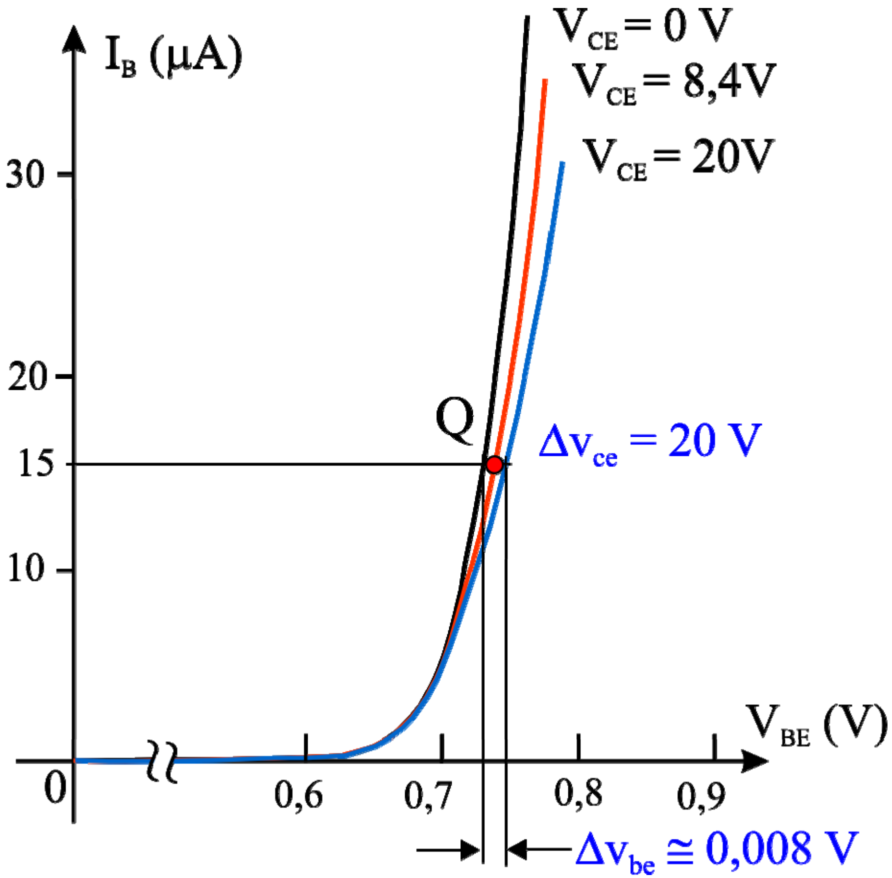
$$h_{oe} = \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}} \approx \left.\frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}} = \frac{(1{,}9-1{,}8)\,\text{mA}}{(10-6{,}8)\,\text{V}} = 31\cdot 10^{-6}\,\Omega^{-1}$$

2.4.- Determinación gráfica de los parámetros h.



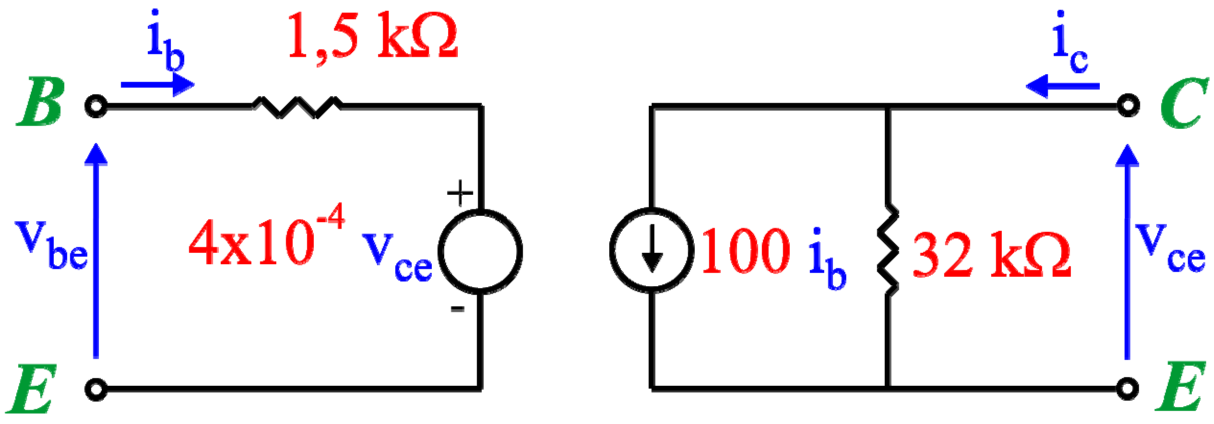
$$h_{ie} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial i_B}\right|_{V_{CE}} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} \approx \left.\frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B}\right|_{\substack{V_{CE} \\ (v_{ce}=0)}} = \frac{0{,}015\ \mathrm{V}}{10\ \mu\mathrm{A}} = 1{,}5\ \mathrm{k}\Omega$$

2.4.- Determinación gráfica de los parámetros h.



$$h_{re} = \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{CE}}\right|_{I_B} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}} \approx \left.\frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}}\right|_{\substack{I_B \\ (i_b=0)}} = \frac{0{,}008 \text{ V}}{20 \text{ V}} = 4 \cdot 10^{-4}$$

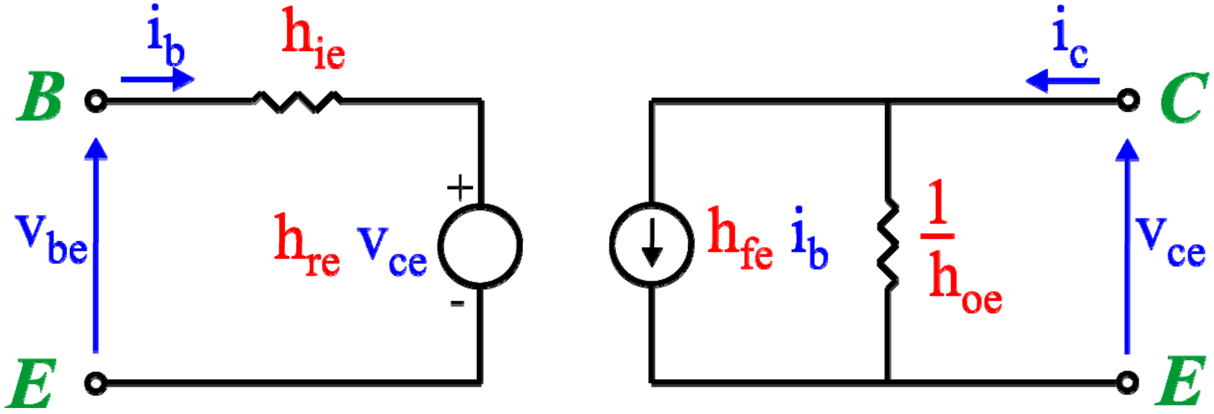
2.4.- Determinación gráfica de los parámetros h.



Valores típicos de los parámetros según la configuración

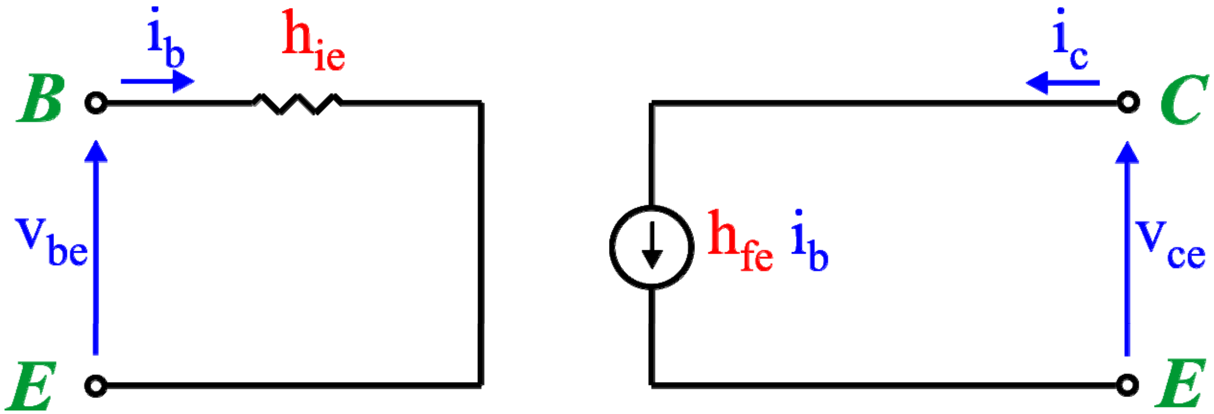
Parámetro	EC	CC	BC
h_i	1 kΩ	1 kΩ	20 kΩ
h_r	2,5 10^{-4}	~ 1	3,0 10^{-4}
h_f	50	-50	-0,98
h_o	25 µA/V	25 µA/V	0,5 µA/V
$1/h_o$	40 kΩ	40 kΩ	2 MΩ

2.5.- Modelo híbrido simplificado.



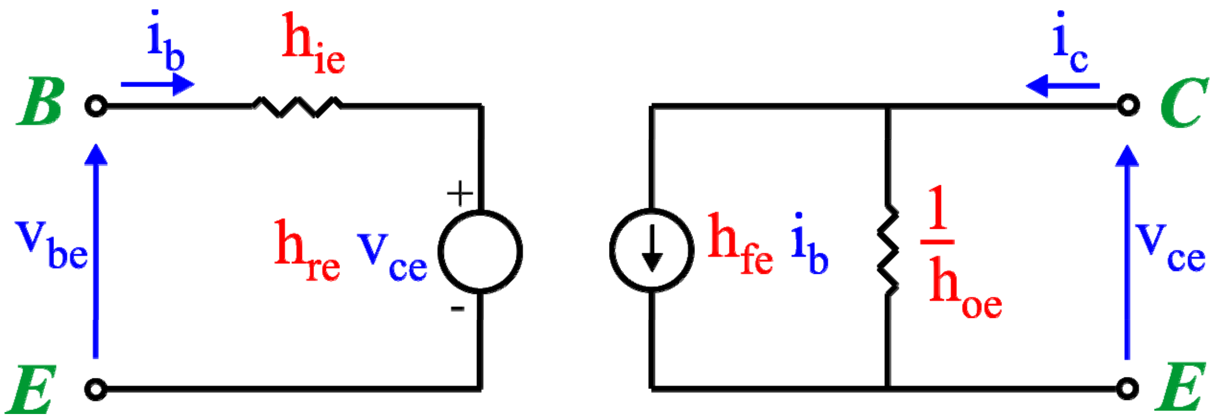
$$h_{re} = h_{oe} = 0$$

Modelo simplificado



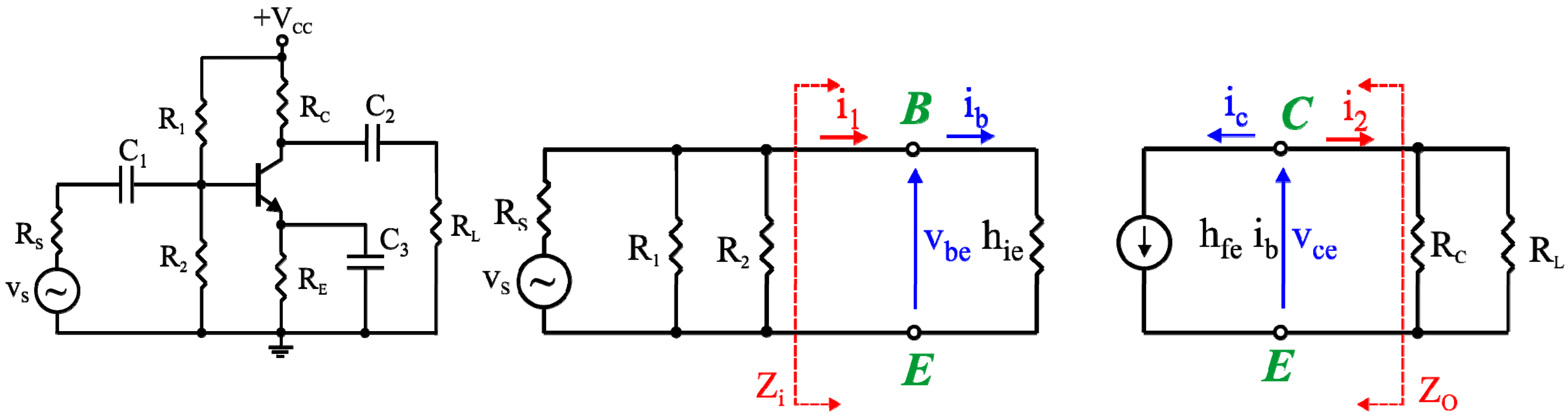
2.6.- Comparación entre las distintas configuraciones.

Con independencia de la configuración
en la que se encuentre el transistor,
SIEMPRE utilizaremos el modelo de parámetros
en ***emisor común***



2.6.- Comparación entre las distintas configuraciones.

Emisor Común



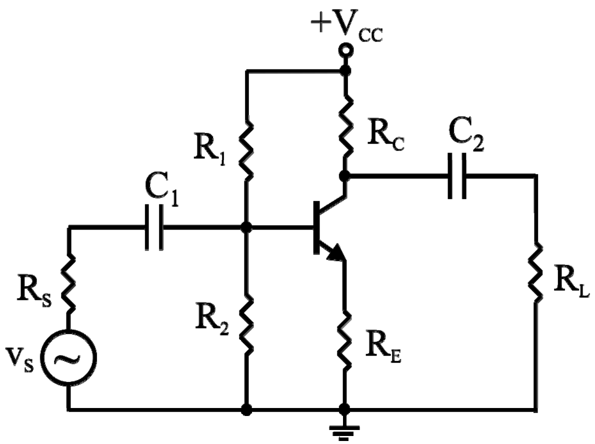
$$A_I = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_c}{i_b} = \frac{-h_{fe} \cdot i_b}{i_b} = -h_{fe}$$

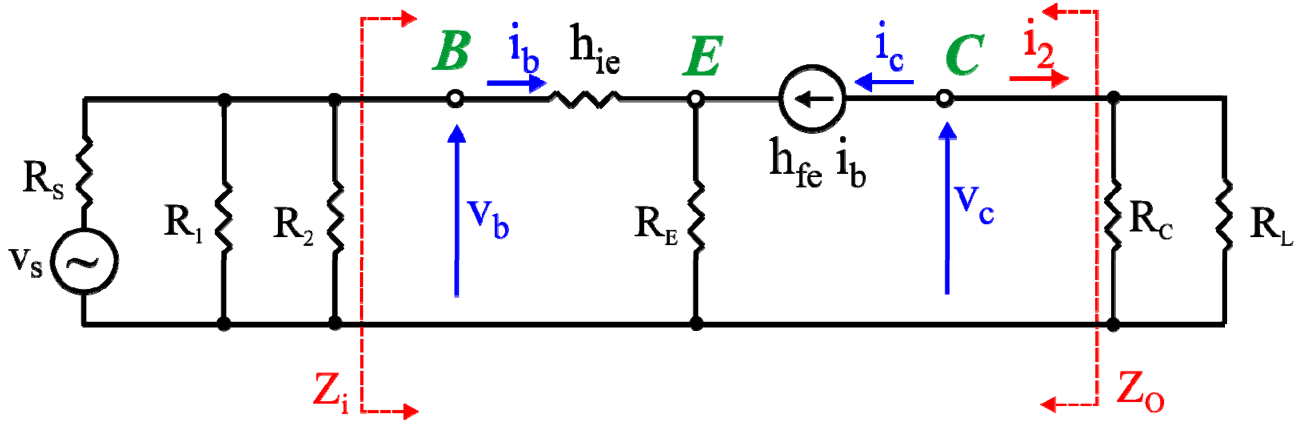
$$Z_i = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{h_{ie} \cdot i_b}{i_b} = h_{ie}$$

$$A_V = \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{-(R_L \,||\, R_C) \cdot i_c}{h_{ie} \cdot i_b} = \frac{-(R_L \,||\, R_C) \cdot h_{fe} \cdot i_b}{h_{ie} \cdot i_b} = -\frac{(R_L \,||\, R_C)}{h_{ie}} \cdot h_{fe}$$

$$Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{v_2}{0} = \infty$$

Emisor Común con R_E





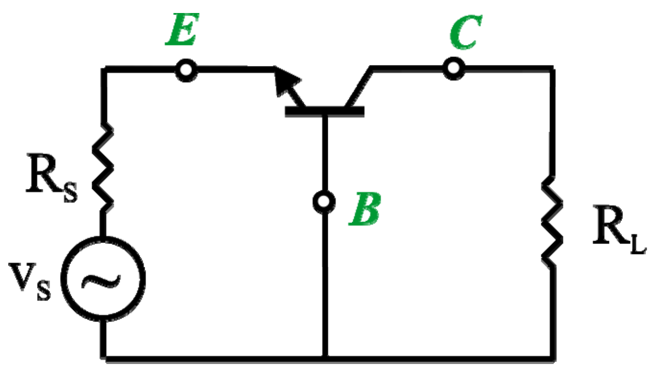
$$A_I = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_c}{i_b} = \frac{-h_{fe} \cdot i_b}{i_b} = -h_{fe}$$

$$Z_i = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_b}{i_b} = \frac{h_{ie} \cdot i_b + R_E \cdot i_b \left(h_{fe} + 1\right)}{i_b} = h_{ie} + R_E \cdot \left(h_{fe} + 1\right)$$

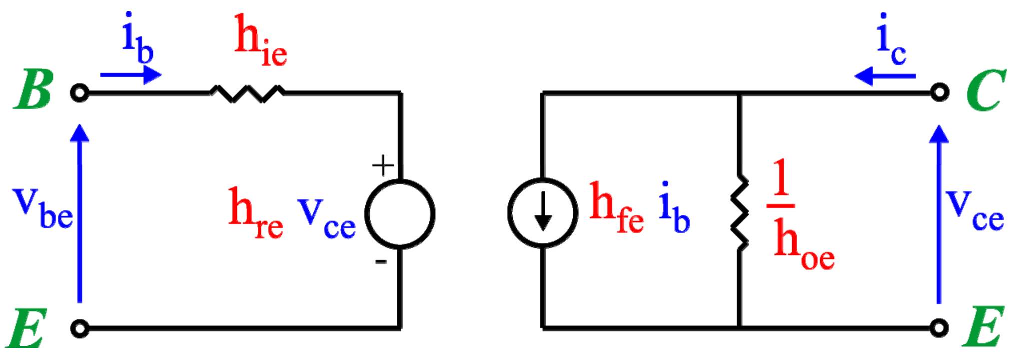
$$A_V = \frac{v_c}{v_b} = \frac{-\left(R_L \| R_C\right) \cdot i_c}{h_{ie} \cdot i_b + R_E \cdot i_b \left(h_{fe} + 1\right)} = \frac{-\left(R_L \| R_C\right) \cdot h_{fe} \cdot i_b}{h_{ie} \cdot i_b + R_E \cdot i_b \left(h_{fe} + 1\right)} = -\frac{\left(R_L \| R_C\right) \cdot h_{fe}}{h_{ie} + R_E \left(h_{fe} + 1\right)}$$

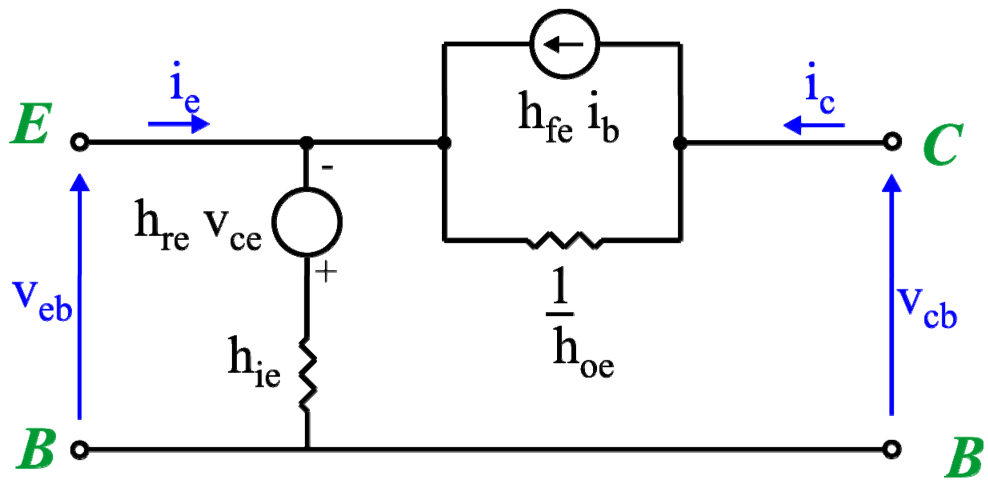
$$Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{v_2}{0} = \infty$$

Base Común

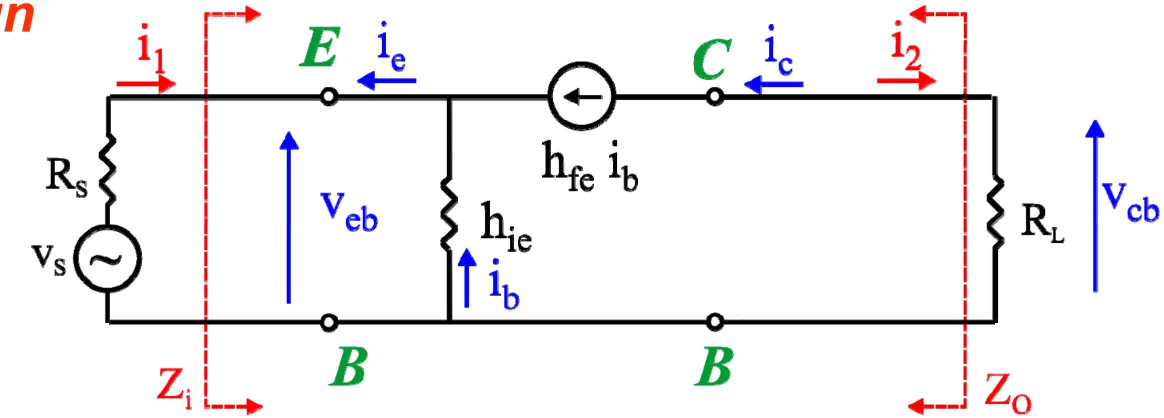


Reordenamos el circuito de parámetros h en Emisor Común





Base Común



$$A_I = \frac{i_2}{i_1} = \frac{-i_c}{-i_e} = \frac{-h_{fe} \cdot i_b}{-(h_{fe}+1) \cdot i_b} = \frac{h_{fe}}{h_{fe}+1}$$

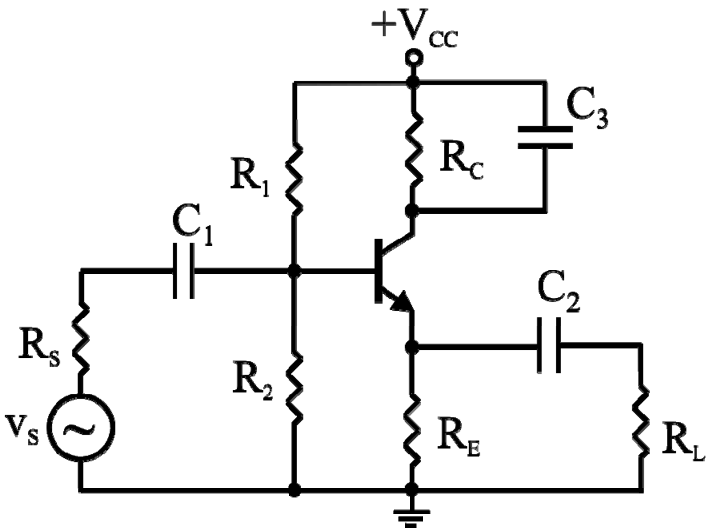
$$Z_i = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_{eb}}{-i_e} = \frac{-h_{ie} \cdot i_b}{-(h_{fe}+1) \cdot i_b} = \frac{h_{ie}}{h_{fe}+1}$$

$$A_V = \frac{v_{cb}}{v_{eb}} = \frac{-R_L \cdot i_c}{-h_{ie} \cdot i_b} = \frac{R_L \cdot h_{fe} \cdot i_b}{h_{ie} \cdot i_b} = \frac{R_L}{h_{ie}} \cdot h_{fe}$$

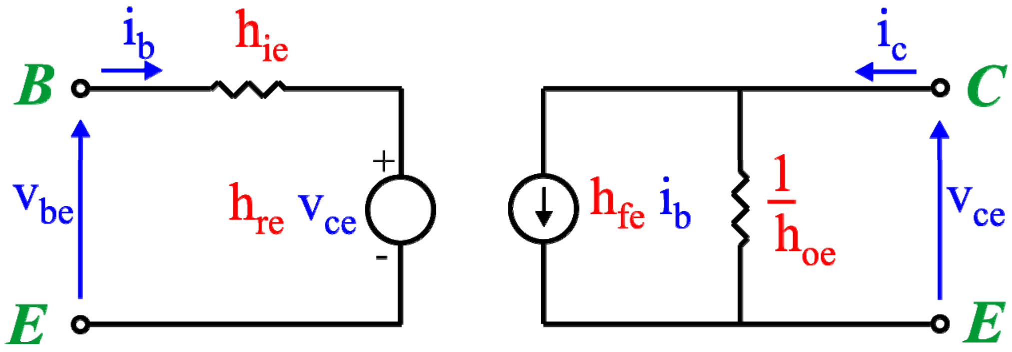
$$Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{v_2}{0} = \infty$$

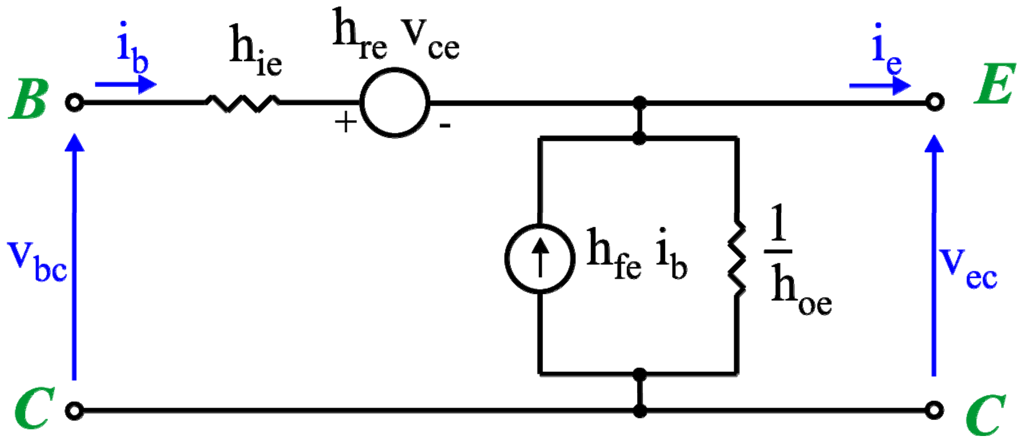
2.6.- Comparación entre las distintas configuraciones.

Colector Común

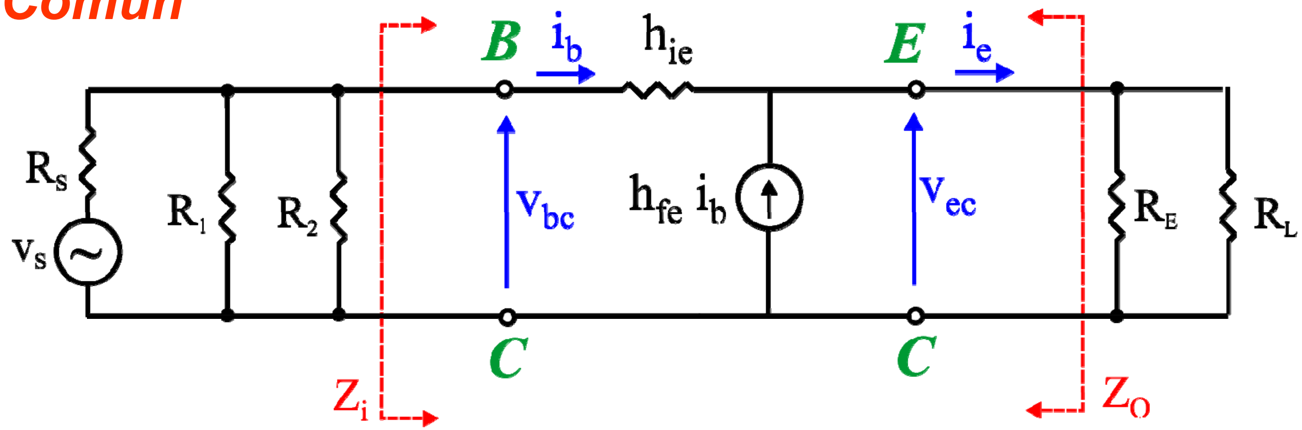


Reordenamos el circuito de parámetros h en Emisor Común





Colector Común



$$A_I = \frac{i_2}{i_1} = \frac{i_e}{i_b} = \frac{(h_{fe}+1)\cdot i_b}{i_b} = h_{fe}+1$$

$$Z_i = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_{bc}}{i_b} = \frac{h_{ie}\cdot i_b + (R_L \,||\, R_E)\cdot i_e}{i_b} = h_{ie} + (R_L \,||\, R_E)\cdot(h_{fe}+1)$$

$$A_V = \frac{v_{ec}}{v_{bc}} = \frac{(R_L \,||\, R_E)\cdot i_e}{h_{ie}\cdot i_b + (R_L \,||\, R_E)\cdot i_e} = \frac{(R_L \,||\, R_E)\cdot(h_{fe}+1)}{h_{ie} + (R_L \,||\, R_E)(h_{fe}+1)}$$

$$Z_o = \frac{v_2}{i_2} = \frac{h_{ie}+R_{eq}}{h_{fe}+1}, \text{ donde } R_{eq} = (R_S \,||\, R_1 \,||\, R_2) \approx R_S$$

2.6.- Comparación entre las distintas configuraciones.

	Emisor Común	*Emisor Común con R_E*	*Base Común*	*Colector Común*
$\mathbf{A_I}$	$-h_{fe}$	$-h_{fe}$	$\dfrac{h_{fe}}{h_{fe}+1}$	$h_{fe}+1$
$\mathbf{Z_i}$	h_{ie}	$h_{ie}+R_E\cdot(h_{fe}+1)$	$\dfrac{h_{ie}}{h_{fe}+1}$	$h_{ie}+(R_L \parallel R_E)\cdot(h_{fe}+1)$
$\mathbf{A_V}$	$-\dfrac{(R_L \parallel R_C)}{h_{ie}}\cdot h_{fe}$	$-\dfrac{(R_L \parallel R_C)\cdot h_{fe}}{h_{ie}+R_E(h_{fe}+1)}$	$\dfrac{R_L}{h_{ie}}\cdot h_{fe}$	$1-\dfrac{h_{ie}}{h_{ie}+(R_L \parallel R_E)(h_{fe}+1)}$
$\mathbf{Z_o}$	∞	∞	∞	$\dfrac{h_{ie}+R_S}{h_{fe}+1}$