

## *Tema 7:*

# *“El TBJ en Alterna. Operación y modelado a pequeña señal”*

*3º Parte*

En los temas anteriores se ha estudiado el funcionamiento del TBJ en condiciones estacionarias; es decir, cuando está polarizado con tensiones y corrientes establecidas de DC.

Sin embargo, en la mayor parte de las aplicaciones, el TBJ trabaja con tensiones y corrientes dependientes del tiempo. Esto es, trabaja en:

### RÉGIMEN DINÁMICO.

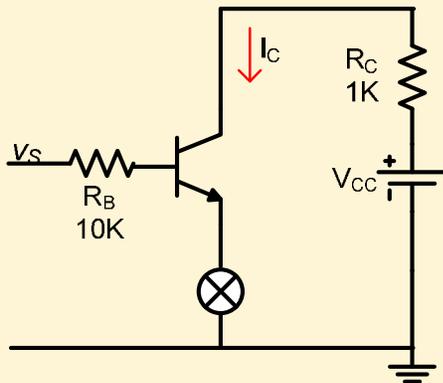
Dentro del grupo de los fenómenos dinámico interesan, fundamentalmente:

- Los regímenes de establecimiento y corte de la corriente cuando el TBJ, está trabajando como llave.
- El régimen lineal, asociado al funcionamiento del TBJ como amplificador de pequeña señal.

El término “pequeña señal” significa que los valores de pico de la tensión o corriente de señal son más pequeños que los valores de continua.

# TBJ COMO LLAVE

## TEMA 7

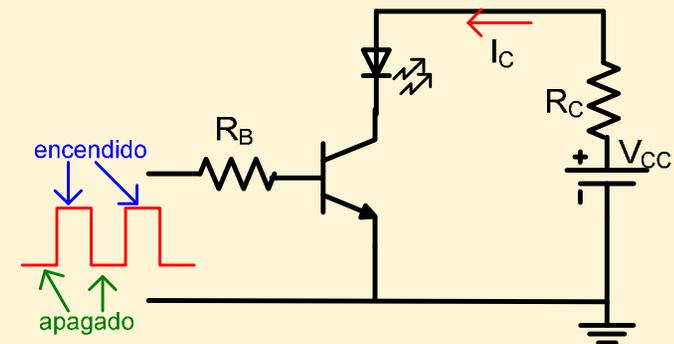


### Ejemplo 1: Llave normalmente abierta

Para  $V_s=0$ ,  $I_c=0$ , lámpara apagada

Para  $V_s>0,7V$ ,  $I_c>0$ , lámpara prendida

[Ver simulación](#)



### Ejemplo 2:

El led de la figura requiere 30 mA para emitir luz. Calcule los valores de las resistencias para que el led prenda con el valor máximo de  $V_s=5V$ .

Considere  $V_{CC}=9V$ ,  $V_{led}=1,6V$ ;  $\beta=50$ ;  $V_{CE sat}=0,3V$

$$1) V_{CC} = V_{Led} + V_{CE Sat} + I_{C Sat} R_C$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{Led} - V_{CE Sat}}{I_{C Sat}} = \frac{9 - 1,6 - 0,3}{0,030} = 236\Omega$$

$$R_C = 220\Omega \Rightarrow I_{C Sat} = 0,032A$$

$$2) I_B = \frac{I_{C Sat}}{\beta} = \frac{0,032}{50} = 645\mu A$$

$$3) R_B = \frac{V_{RB}}{I_{B min}} = \frac{V_{entrada} - V_{BE}}{I_{B min}}$$

$$R_B = \frac{5 - 0,7}{2 \times 645\mu A} = 3300\Omega$$

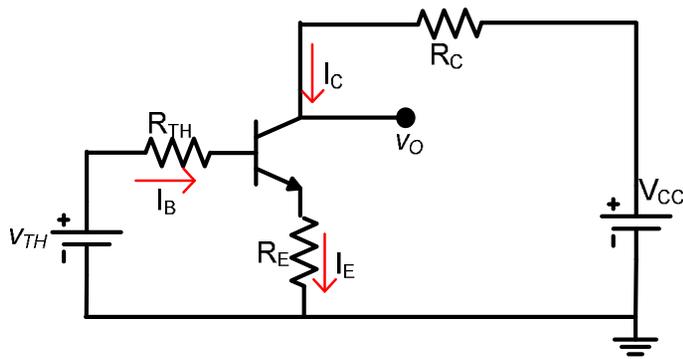
3

Una de las aplicaciones más típicas del TBJ es su uso como amplificador de corriente alterna.

- Para que este sistema funcione, el TBJ debe estar polarizado en la región activa directa (RAD).
- Esto significa que simultáneamente conviven elementos de corriente continua (cc) y corriente alterna (ca).
- Se deben analizar los efectos de ambas componentes y se introducen conceptos dinámicos de funcionamiento de los sistemas basados en TBJ
- Como el sistema es lineal se puede aplicar Teorema de superposición

# TBJ COMO AMPLIFICADOR

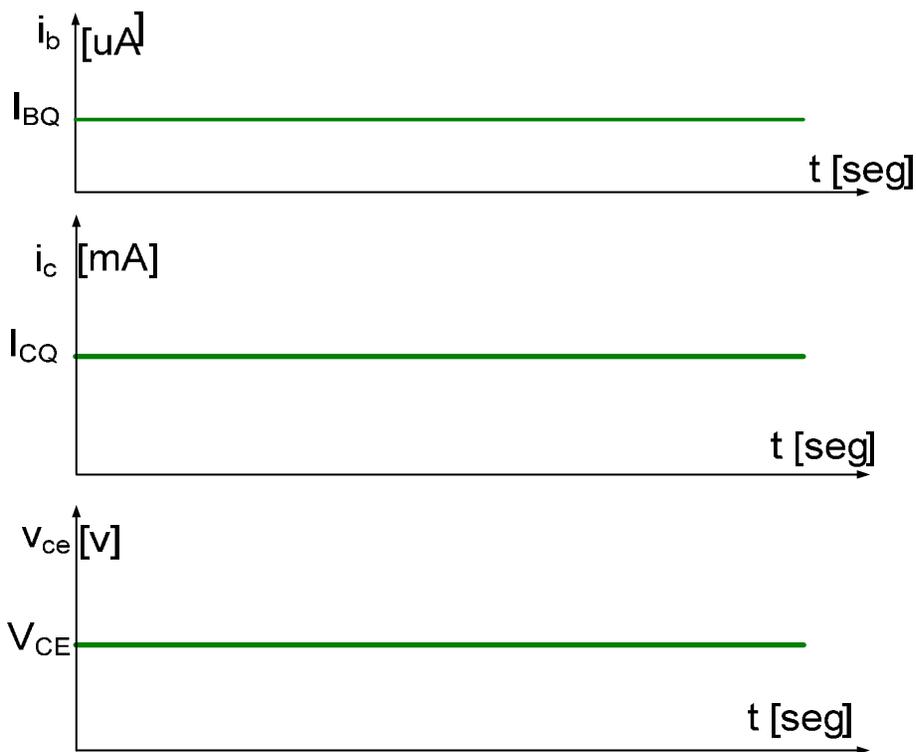
## TEMA 7



El transistor polarizado de la Fig. se encuentra en zona activa.

En la fig inferior se observan los valores las tensiones y corrientes de polarización:

$i_C = I_{CQ}$ ,  $v_{CE} = V_{CEQ}$ ;  $i_B = I_{BQ}$  y  $v_{BE} = V_{BEQ}$   
(los valores son en corriente continua).



$$V_{TH} = V_{BE} + I_B (R_{TH} + (1 + \beta) R_E)$$

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

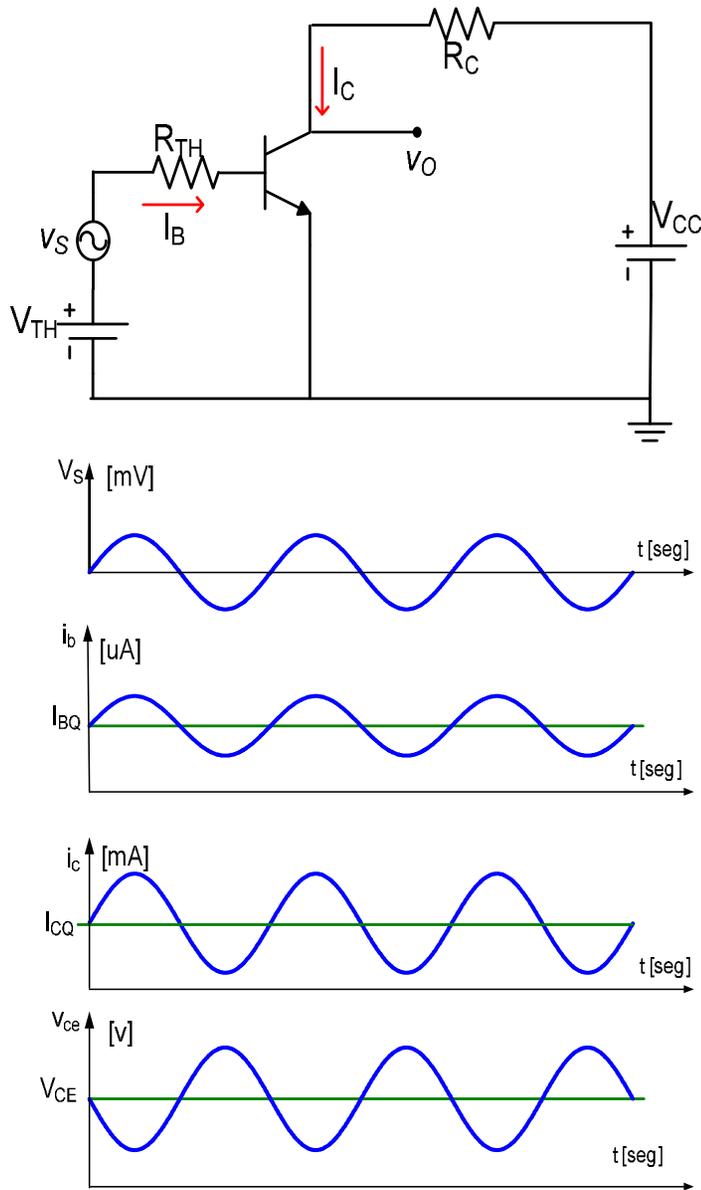
Si  $\beta > 100$ :

$$V_{TH} = V_{BE} + I_B (R_{TH} + \beta R_E)$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

# TBJ COMO AMPLIFICADOR

TEMA 7



Si se aplica una señal alterna  $v_s(t)$  al circuito de entrada, entonces la tensión aplicada a la juntura B-E variará.

Si las variaciones son tales que la tensión  $V_{BE}$  aumenta, entonces la corriente de base  $I_B$ , también aumenta, por lo tanto,  $I_C$  aumenta, de esta forma, la tensión  $R_C \cdot I_C$  crece haciendo que  $V_{CE}$  disminuya y viceversa.

Observar que cada una de las variables posee una componente DC y una AC.

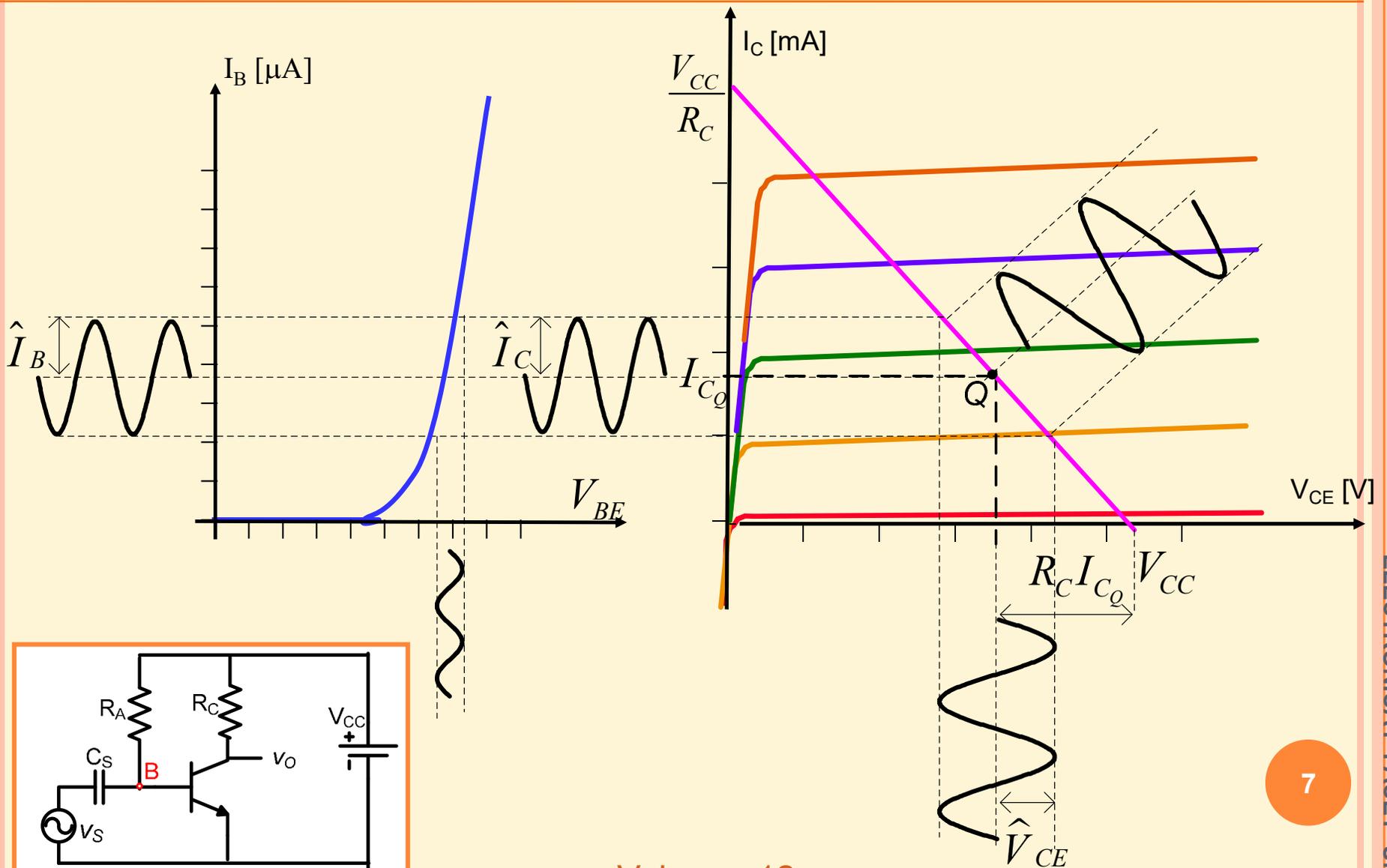
**Considerado que el transistor será usado como un sistema capaz de amplificar señales, el dispositivo recibe corriente continua para efectos de polarización (funcionamiento) y señales de corriente alterna, las que serán amplificadas.**

**Ambas deben convivir simultáneamente sin que una afecte a la otra.**

Se puede aplicar Teorema de Superposición

# TBJ COMO AMPLIFICADOR

TEMA 7



[Volver a 12](#)

7

### Concepto de Recta de carga de DC y AC

- La recta de carga estática está definida por la ecuación dada por la malla de polarización del circuito de salida.
- La recta de carga dinámica está definida por la relación que impone el circuito exterior entre la componente alterna de la corriente de colector y la componente alterna de la tensión colector-emisor (Circuito equivalente de alterna)

### Recta de carga Alterna o Dinámica

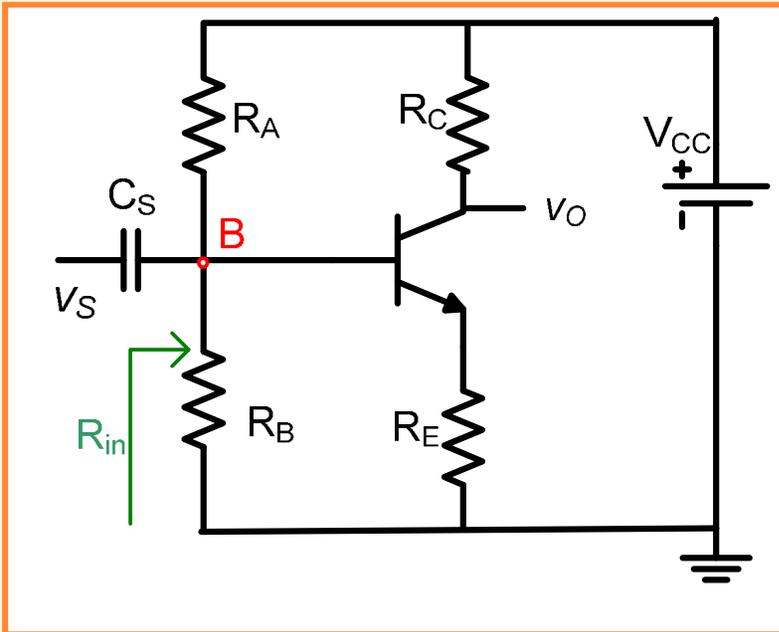
- Dada la existencia de componente continua y señal alterna, en el circuito de salida:

$$I_c = I_C + i_c \quad \wedge \quad V_{ce} = V_{CE} + v_{ce}$$

- Así como la recta de carga para continua se usa para analizar el circuito de polarización, **la recta de carga dinámica se usa para analizar el funcionamiento del circuito**, cuando está excitado con una señal de alterna.
- En los circuitos encontraremos, capacitores ya que es el elemento natural para actuar como separador de las señales.
- Para calcular (y dibujar) la recta de carga dinámica, se analizarán tres tipos de configuraciones de circuitos.

## Recta de carga de Alterna o Dinámica

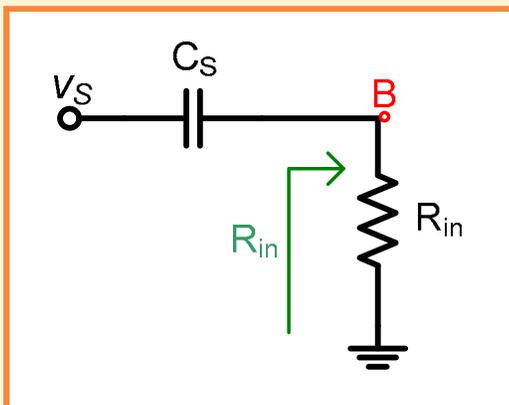
### Configuración 1



El capacitor  $C_s$  impide el ingreso de continua al punto (B) y a su vez permiten conectar la excitación con el circuito.

El capacitor  $C_s$  se llama capacitor de desacople.

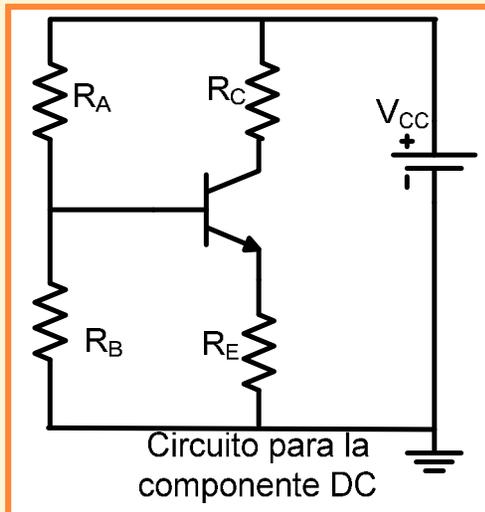
Para calcular el mismo, se deberá considerar que :



$$X_{CS} = \frac{1}{\omega C_s} \ll R_{in}$$

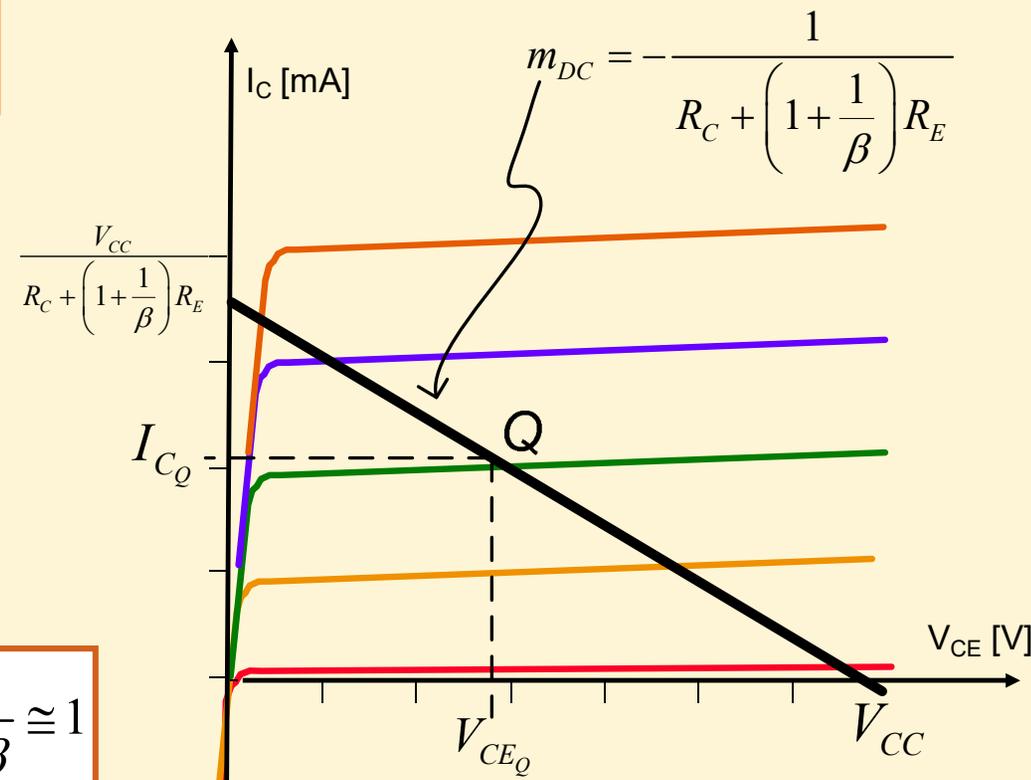
Cuidado!!!:

$$R_{in} \neq R_B$$



**Repaso:** La ecuación de salida en cc del circuito (b) nos brinda la recta de carga de DC o estática:

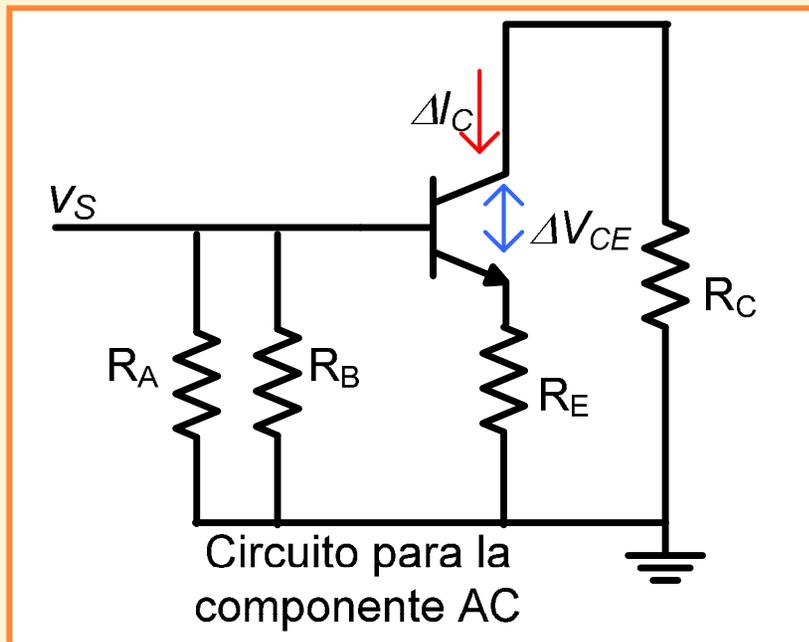
$$I_C = -\frac{1}{R_C + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)R_E}$$



$$\text{Si } \beta \geq 100 \Rightarrow 1 + \frac{1}{\beta} \cong 1$$

# TBJ COMO AMPLIFICADOR

## TEMA 7



Para ca (alterna) se considera el circuito .

Dadas las variaciones en torno al punto Q, sea  $\Delta v_{CE}$ ; la variación de la tensión CE respecto de dicho punto y  $\Delta i_C$  la variación de la corriente de colector respecto al mismo punto, entonces, la variación de tensión está dada por:

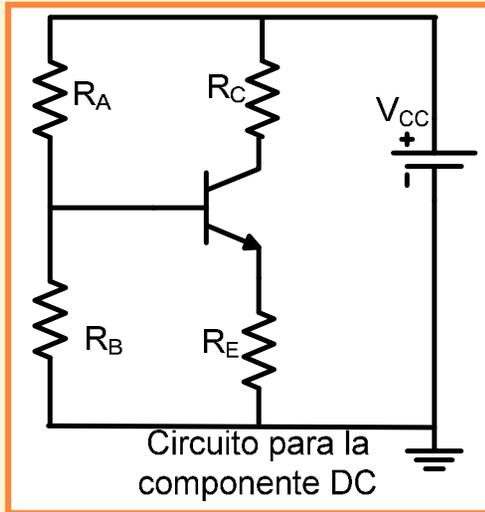
$$\Delta v_{CE} = v_{CE} - V_{CEQ}$$

$$\Delta i_C = i_C - I_{CQ}$$

[Ver grafico](#)

Entonces:

$$\Delta v_{CE} = - \left( R_C + \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) R_E \right) \cdot \Delta i_C$$



Se escribe la ecuación de salida para la alterna, pero se incluye a la fuente:

$$V_{CC} = i_c R_C + v_{ce} + i_e R_E$$

$$V_{CC} = i_c R_C + v_{ce} + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_E i_c$$

$$i_c = \frac{-v_{ce}}{R_C + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_E}$$

$$i_c \cong \frac{-v_{ce}}{R_C + R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

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

$$b = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

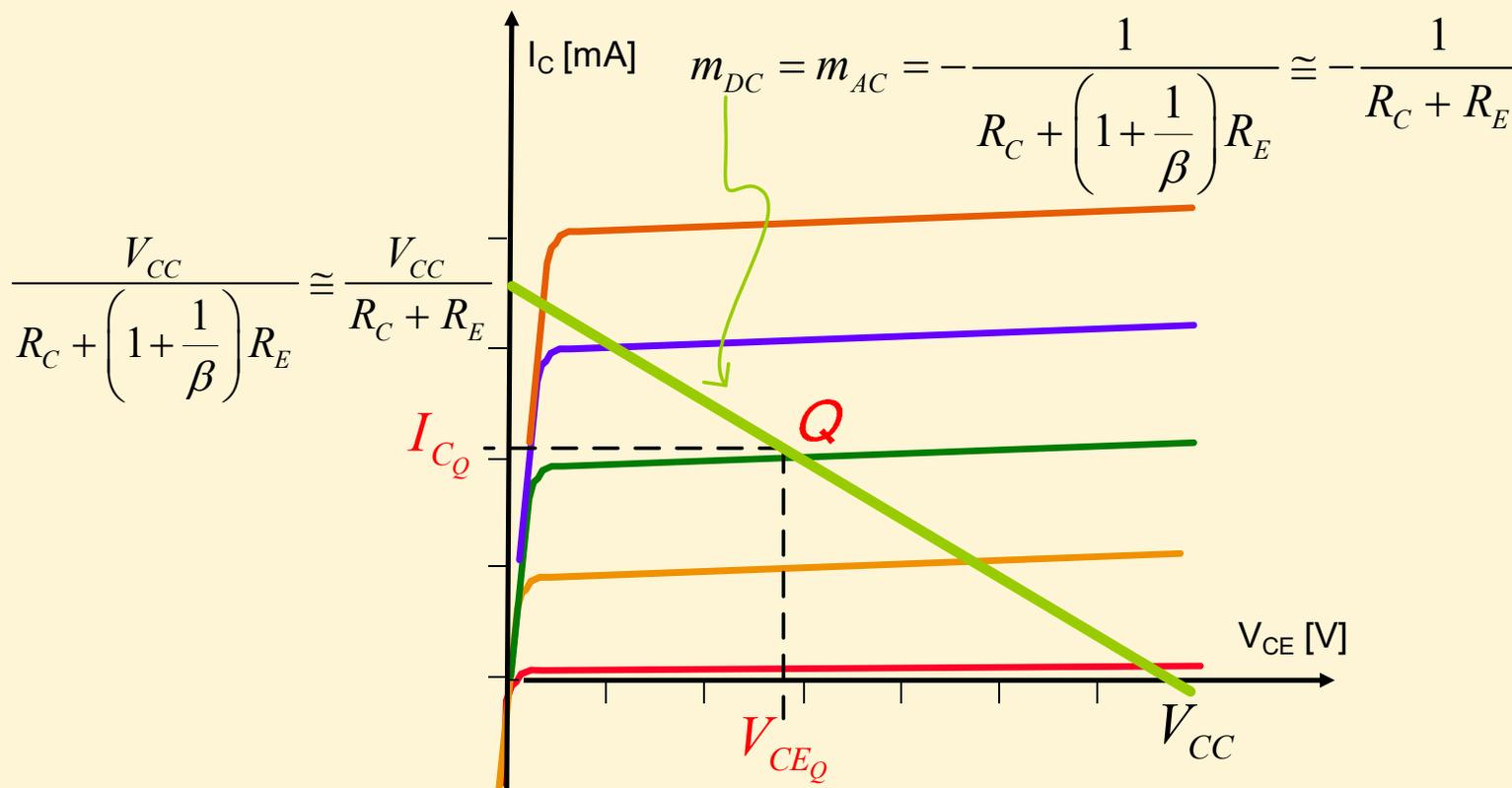
Para  $i_c = 0$   $\Rightarrow$   $V_{CC} = v_{ce}$

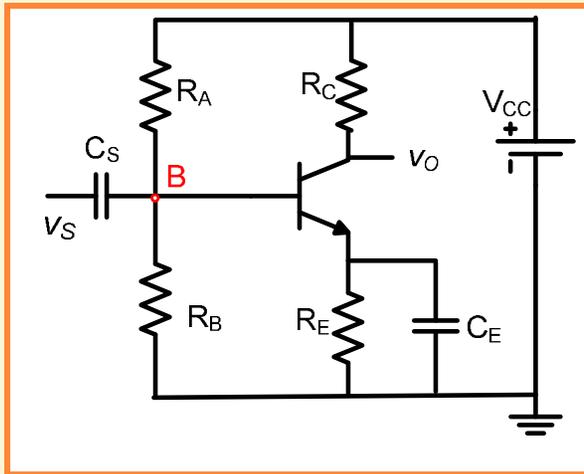
Si  $\beta \geq 100 \Rightarrow 1 + \frac{1}{\beta} \cong 1$

Para  $v_{CE} = 0$   $\Rightarrow$   $i_c = \frac{V_{CC}}{R_C + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_E} \cong \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$

Entonces, en este circuito:

- Las rectas de carga estática y dinámica coinciden
- Los punto de polarización de DC y AC coinciden





### Configuración 2

El  $C_E$  (bypassed capacitor) en ca, funciona como un cortocircuito haciendo que el emisor sea el terminal común, desde el punto de vista de las señales alternas:

$$X_{CE} = \frac{1}{\omega C_E} \ll R_E$$

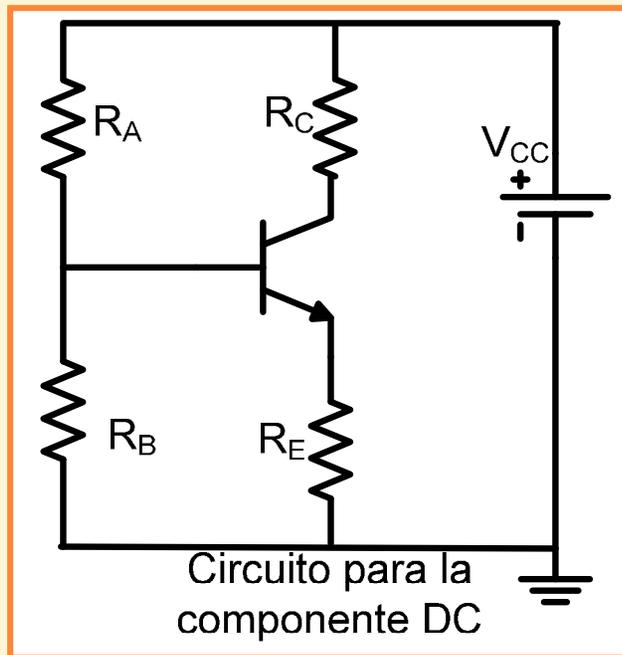
### Análisis para DC

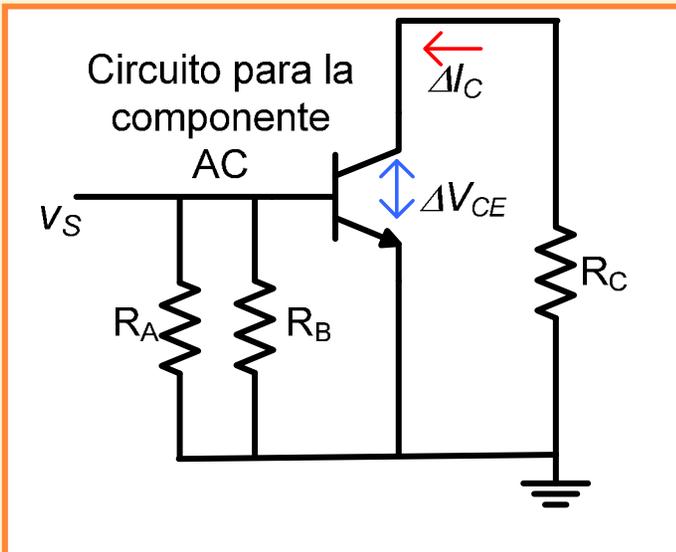
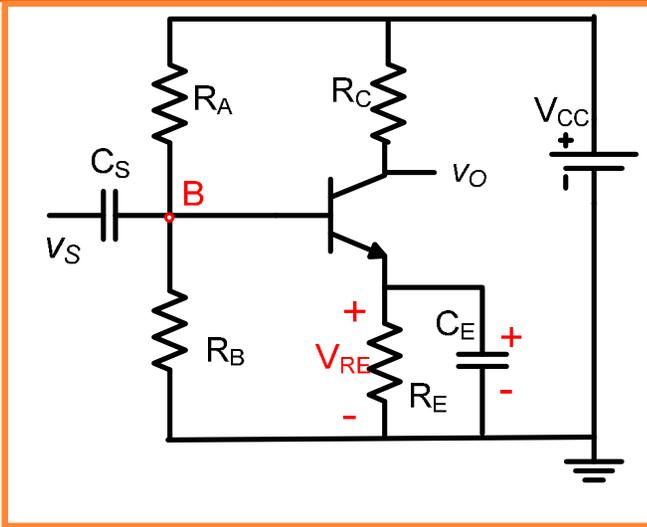
$$I_C = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

**Puntos de Intersección con los ejes:**

$$V_{CE} = V_{CC} \quad \text{Para } I_C = 0$$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad \text{Para } V_{CE} = 0$$





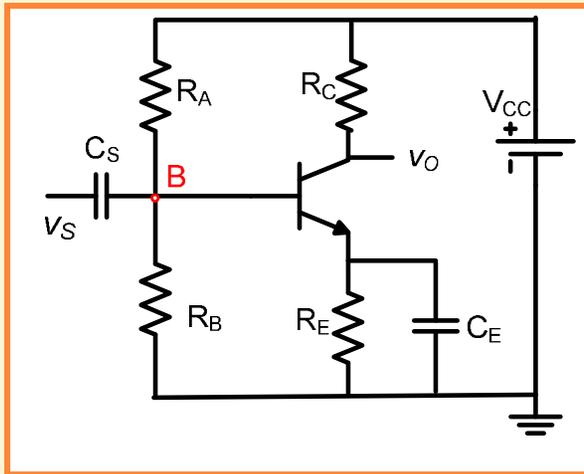
## Observaciones:

- El capacitor  $C_S$  es un corto circuito para la alterna
- La fuente de alimentación es vista por la alterna como un cortocircuito
- Por  $R_E$  solo circula continua pues la alterna se fue a masa a través del  $C_E$ . La tensión que se desarrolla en  $R_E$

$$V_{RE} = I_E R_E \approx I_C R_E$$

- El capacitor  $C_E$  se carga al valor de pico de la tensión que se desarrolla en  $R_E$ .

# RECTA DE CARGA AC- MÉTODO PRACTICO TEMA 7



Se escribe la ecuación de la malla de salida:

$$V_{CC} = i_c R_C + v_{ce} + V_{RE}$$

$$i_c = -\frac{v_{ce}}{R_C} + \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C}$$

\*\*Recordar que  $V_{RE}$  es la tensión a la cual se cargó el capacitor  $C_E$

$$y = mx + b$$

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

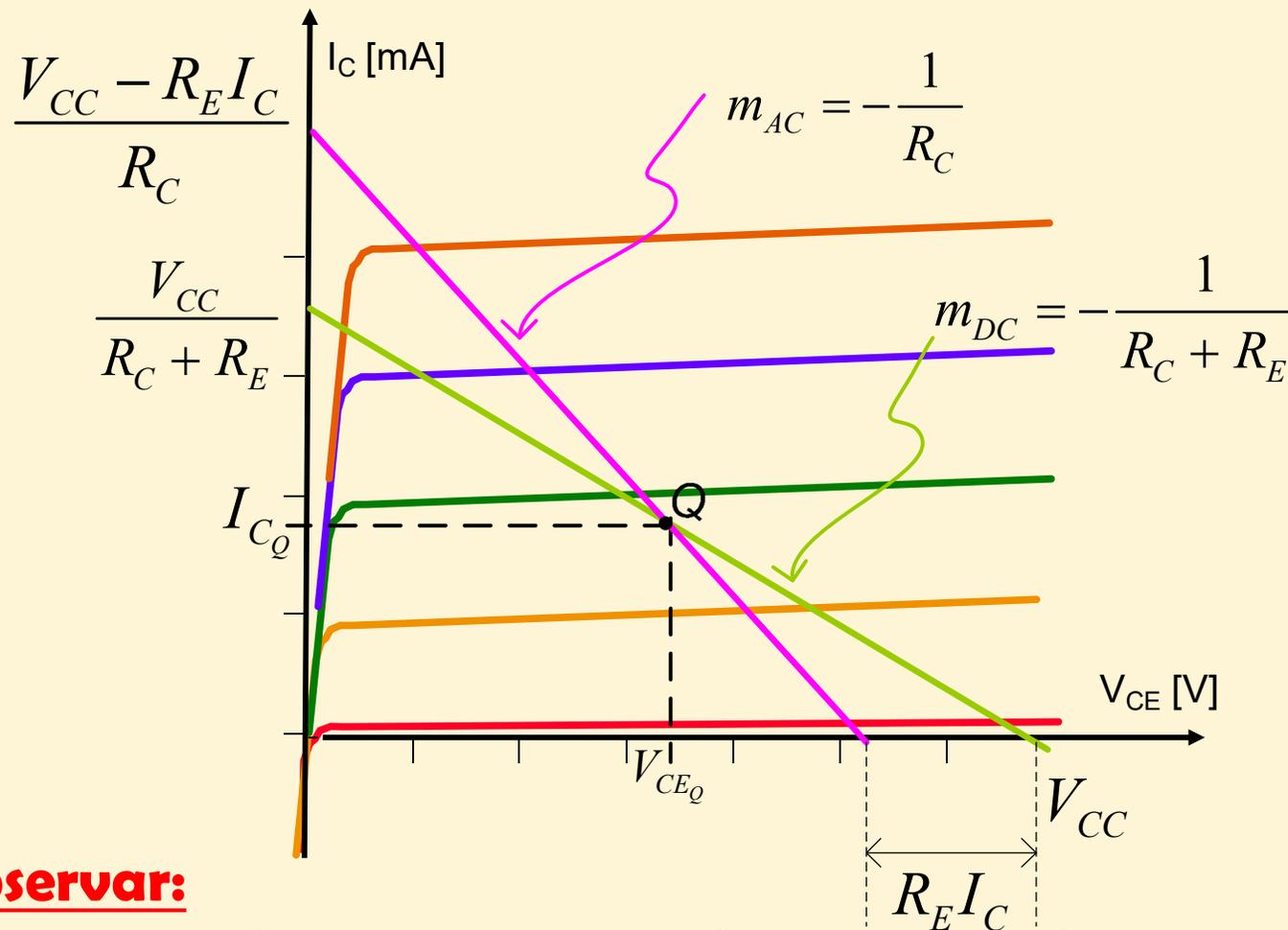
$$b = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C}$$

$$V_{RE} = I_E R_E = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_C R_E \cong I_C R_E$$

**Puntos de Intersección con los ejes:**

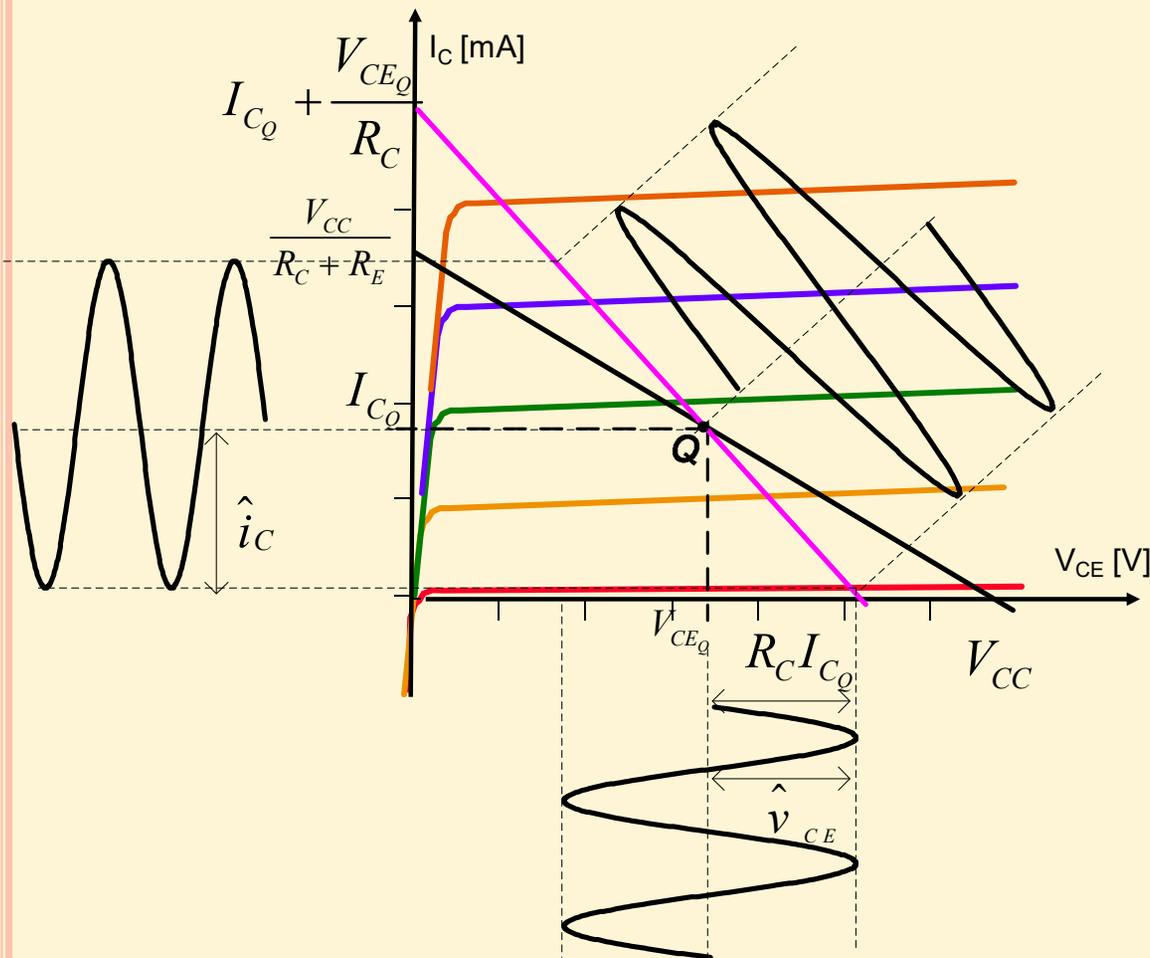
Para  $i_c = 0$   $V_{CE} = V_{CC} - V_{RE}$

Para  $v_{CE} = 0$   $i_c = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C}$

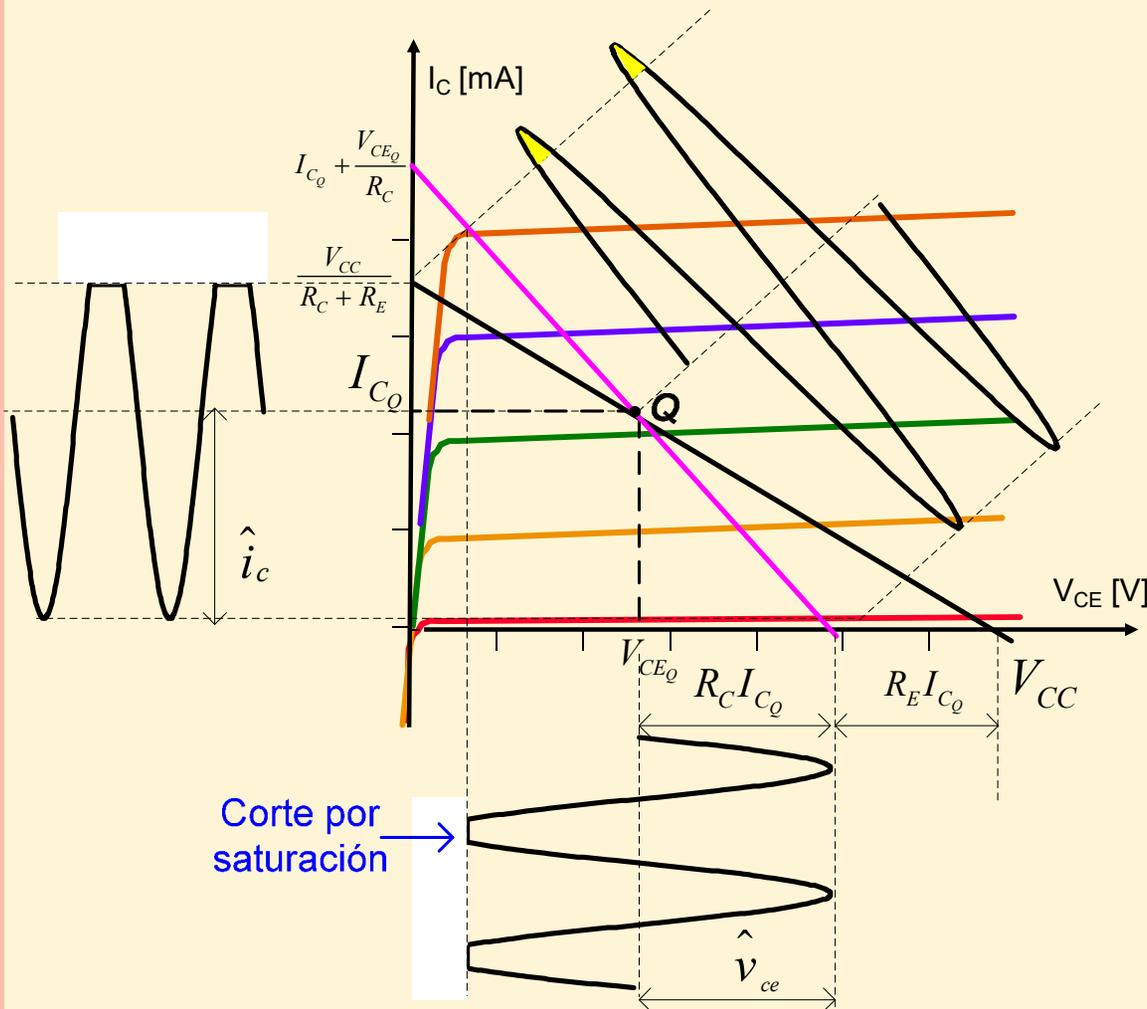


### Observar:

- Las rectas de cargas tienen distintas pendientes.
- Las rectas se intersecan en el punto de operación.



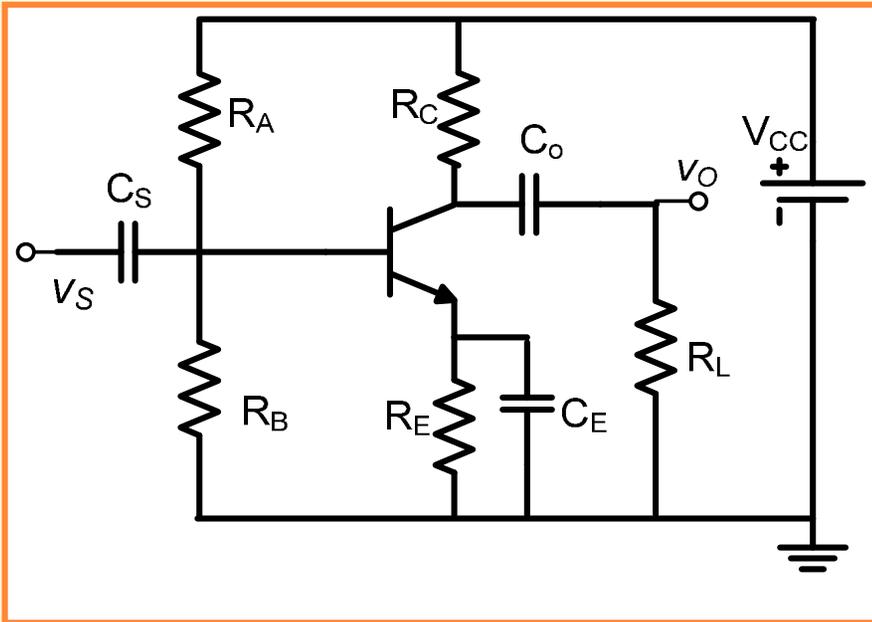
- Se observa :
- El punto Q no está ubicado en forma simétrica
- La máxima amplitud que puede alcanzar la señal de alterna de la salida, es igual a  $R_C \cdot I_{CQ}$
- Valores mayores provocarán (en este caso) recorte del pico positivo, distorsionando la señal de salida



Corte por saturación

$$\hat{i}_c = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{2R_C}$$

- Se observa :
- Como el punto de operación Q no está ubicado en forma simétrica se produce el recorte de uno de los picos de la señal
- Para este punto de polarización, la máxima amplitud que puede alcanzar la corriente alterna de colector es el menor de los valores
- Valores mayores provocarán (en este caso) recorte del pico positivo, distorsionando la señal de salida



### Configuración 3

Una de las configuraciones típicas amplificadoras es el circuito de emisor común, el cual recibe una señal  $v_S(t)$  que es transmitida hacia la salida  $v_O(t)$

Los capacitores,  $C_S$  y  $C_O$ , permiten conectar la excitación con el circuito y a su vez unir el circuito con la carga.

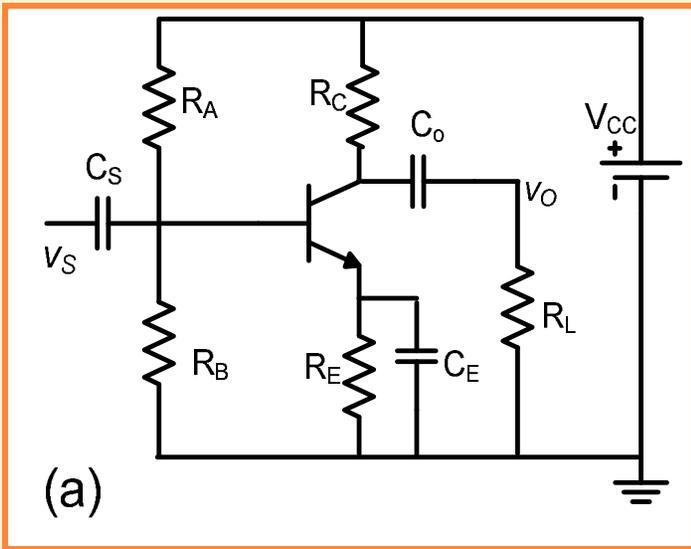
Estos condensadores permiten la interconexión con fuentes de señal, carga u otra etapa de amplificación, su rol consiste en bloquear las componentes de cc, por lo que reciben el nombre de capacitores de desacople.

El capacitor  $C_O$  debe transmitir la señal amplificada a la carga. Para ello se debe cumplir:

$$X_{C_O} = \frac{1}{\omega C_O} \ll R_L$$

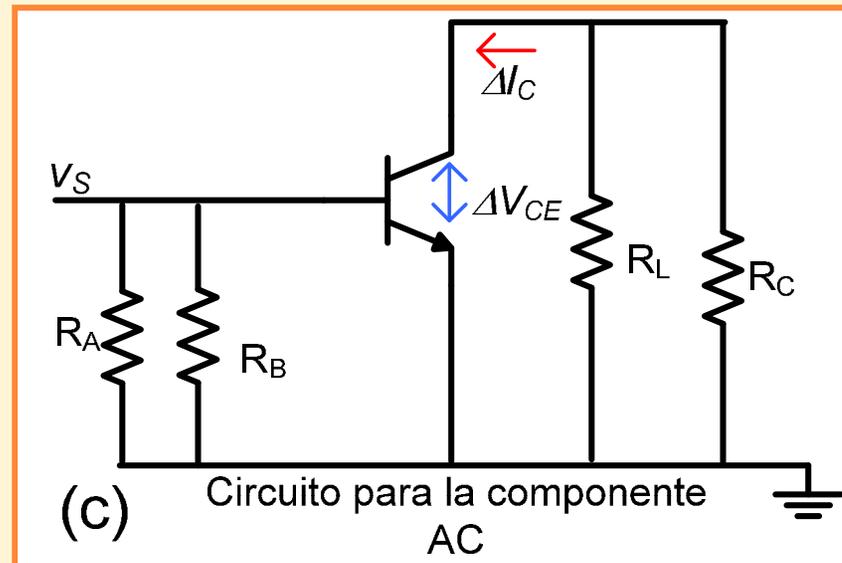
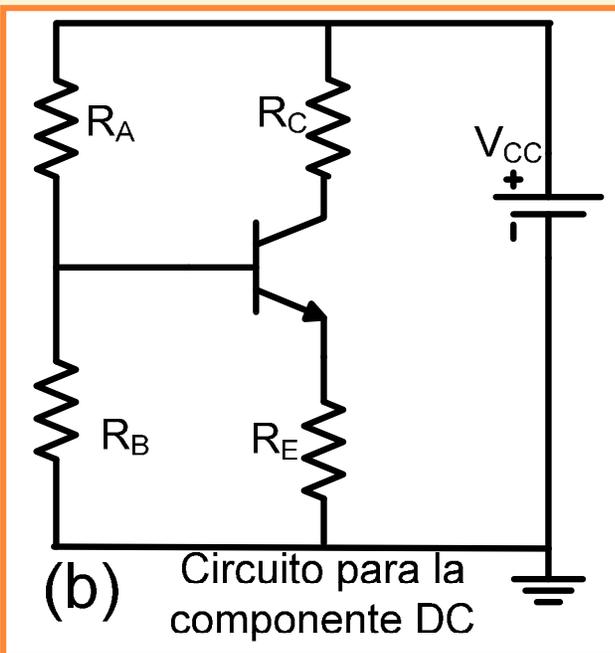
# TBJ COMO AMPLIFICADOR

TEMA 7



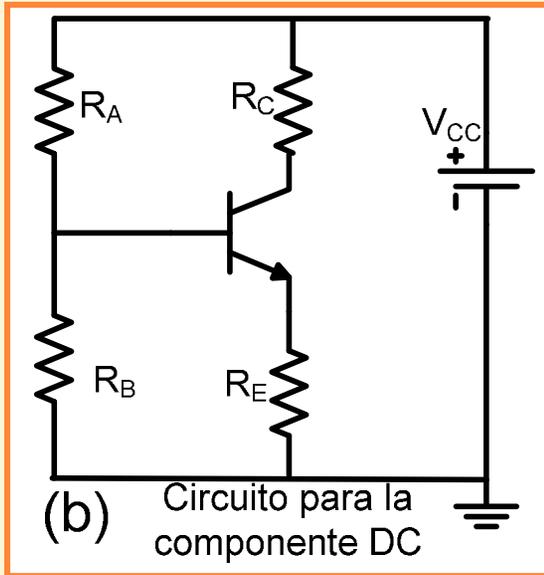
Como las componentes alternas y continuas circularán por diferentes elementos del circuito, se establece una red de salida para corriente continua y otra para corriente alterna.

Esto no significa que sean circuitos distintos, sino que se comportan de distinta manera, tanto para cc como para ca, así se tendrán dos rectas de carga.



# TBJ COMO AMPLIFICADOR

TEMA 7



La ecuación de salida en DC del circuito (b) nos brinda la recta de carga de DC:

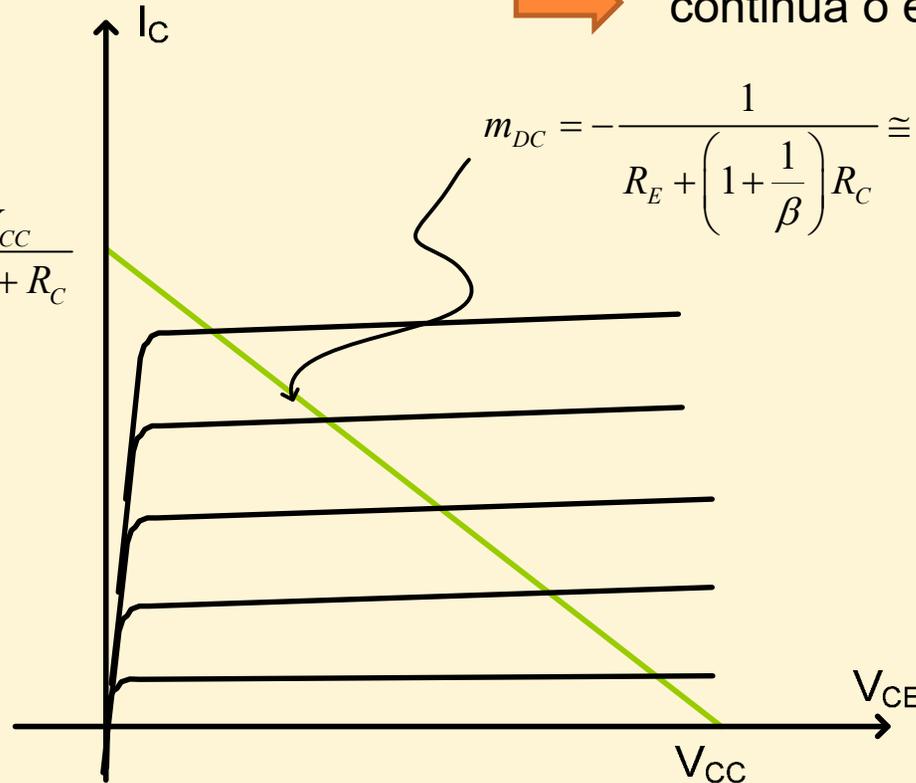
$$I_{CQ} = -\frac{1}{R_C + R_E} V_{CEQ} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$R_{DC} = R_C + R_E$$

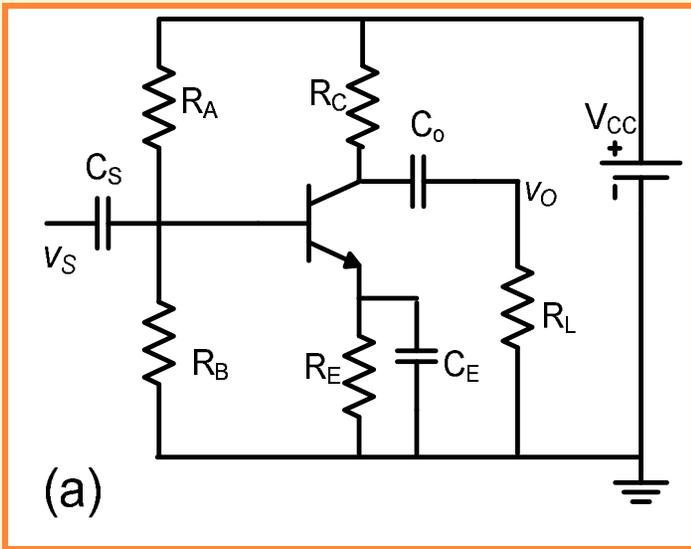
Recta de carga de continua o estática

$$\frac{V_{CC}}{R_E + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_C} \cong \frac{V_{CC}}{R_E + R_C}$$

$$m_{DC} = -\frac{1}{R_E + \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) R_C} \cong -\frac{1}{R_E + R_C}$$



# RECTA DE CARGA AC- MÉTODO PRACTICO TEMA 7



Sabiendo que:

1.  $R_L$  se pone en paralelo con  $R_C$  para la alterna,
2. y que el capacitor  $C_E$  es un cortocircuito para la alterna y que se carga al valor de tensión continua que se desarrolla sobre  $R_E$ ,
3. se escribe la ecuación de la malla de salida.

$$y = mx + b$$

$$m = -\frac{1}{R_C // R_L}$$

$$b = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C // R_L}$$

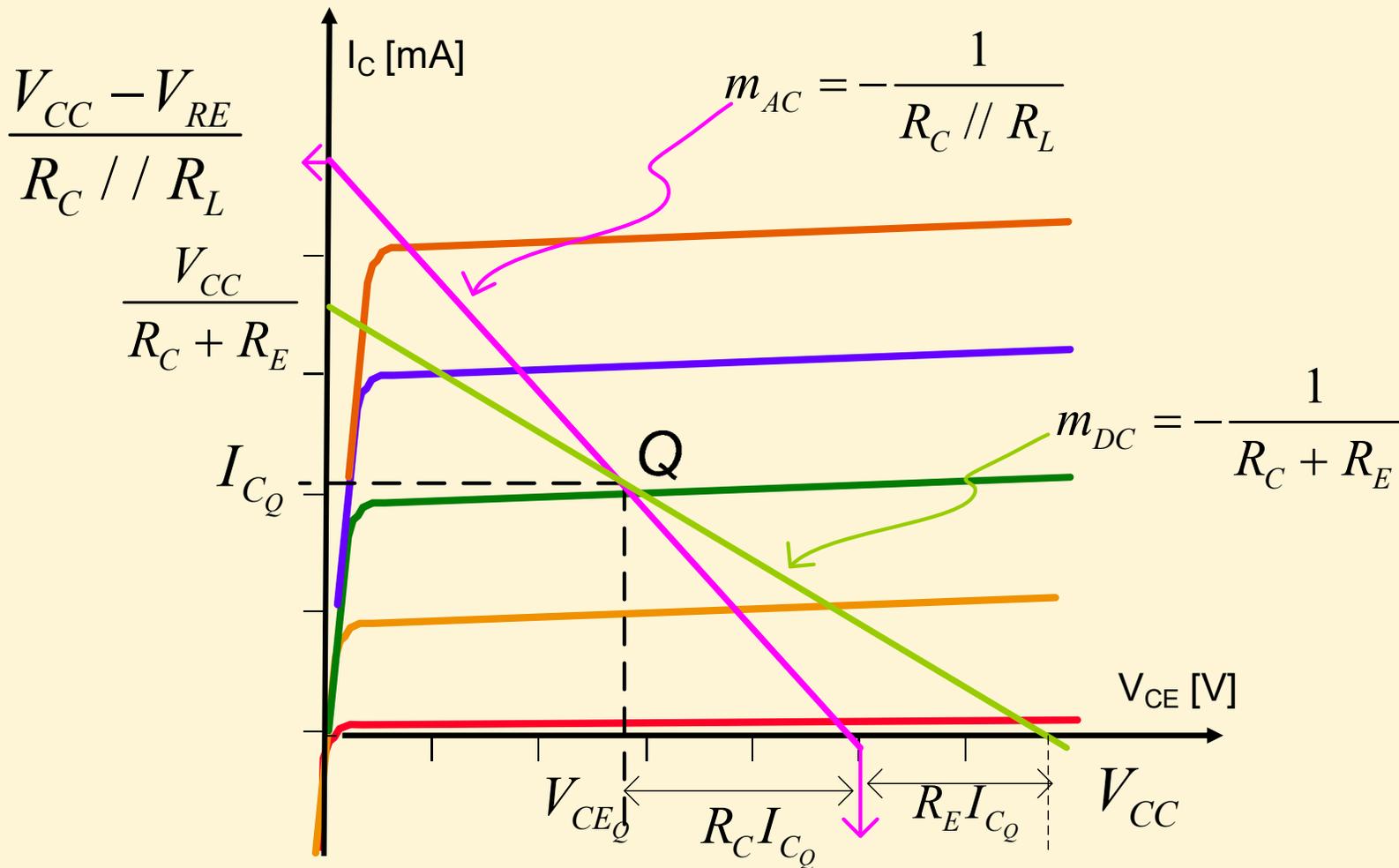
**Puntos de Intersección con los ejes:**

$$V_{CC} = i_c (R_C // R_L) + v_{ce} + V_{RE}$$

$$i_c = -\frac{v_{ce}}{R_C // R_L} + \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C // R_L}$$

$$\text{Para } i_c = 0 \quad v_{ce} = V_{CC} - V_{RE}$$

$$\text{Para } v_{CE} = 0 \quad i_c = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{R_C // R_L}$$

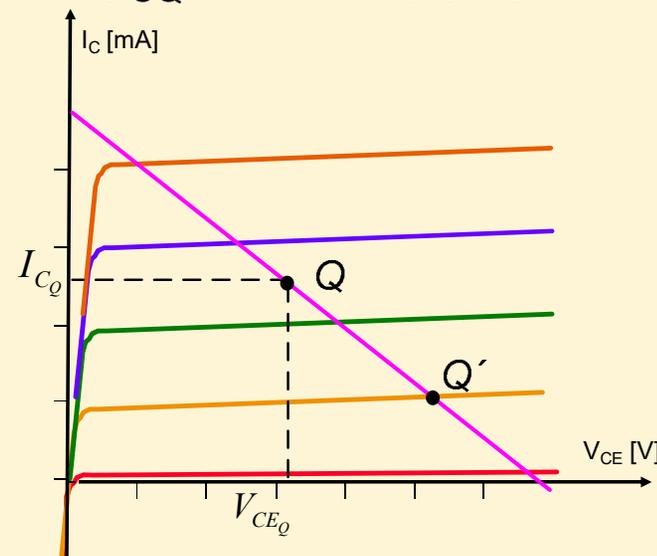


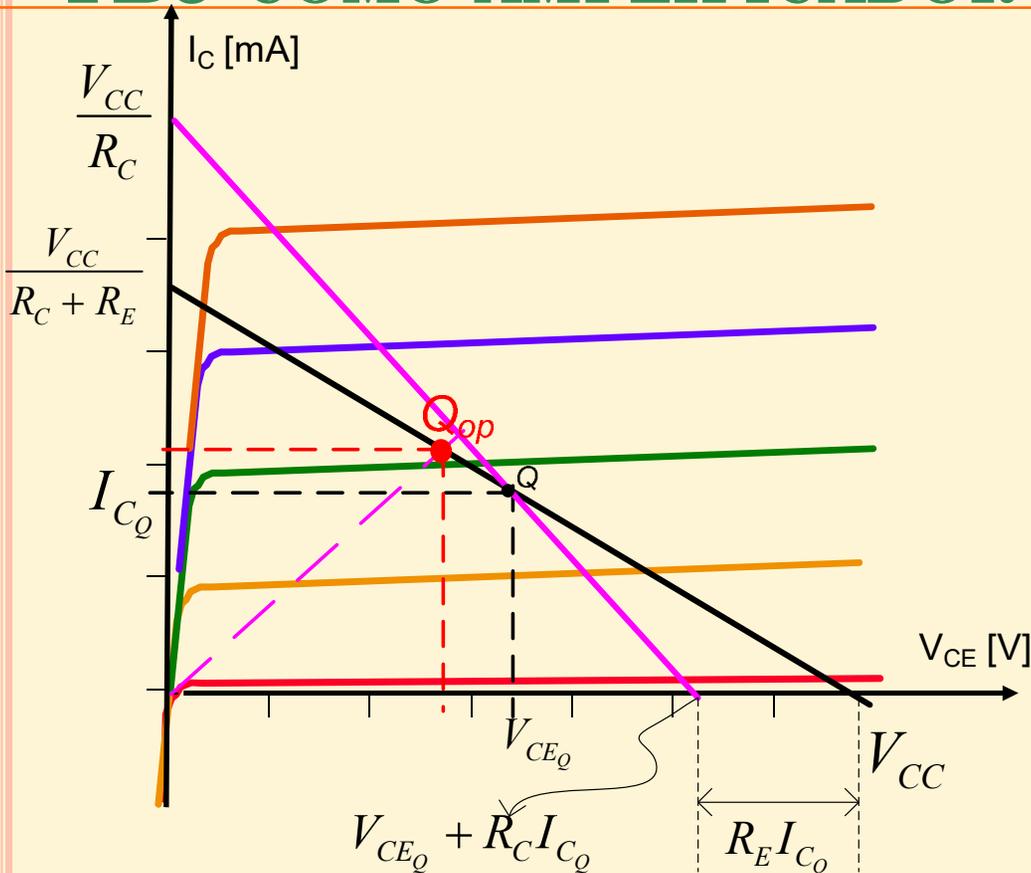
Al superponer una señal variable a la corriente de base, el P.O. puede tomar cualquier valor sobre la “recta dinámica de carga” El punto de operación Q, será ubicado según la necesidad del problema particular. Por ejemplo:

Si el objetivo que perseguimos es obtener la máxima excursión simétrica posible, el P.O. deberá estar ubicado en la mitad de la recta dinámica de carga (Q), punto de operación para máxima excursión de salida.

Si el objetivo perseguido es tener un consumo bajo en reposo, el P.O. deberá fijarse cerca del eje de abscisas ( $I_{CQ}$  pequeña) (Q')

El diseñador del circuito es quien determinará el criterio para fijar el punto de operación, para un circuito en particular.





### Punto polarización óptimo para máxima excursión simétrica

▪ Para obtener una **excursión máxima en corriente**, que permita una salida máxima de tensión en la carga, se debe colocar el punto Q en el centro de la recta de carga de AC.

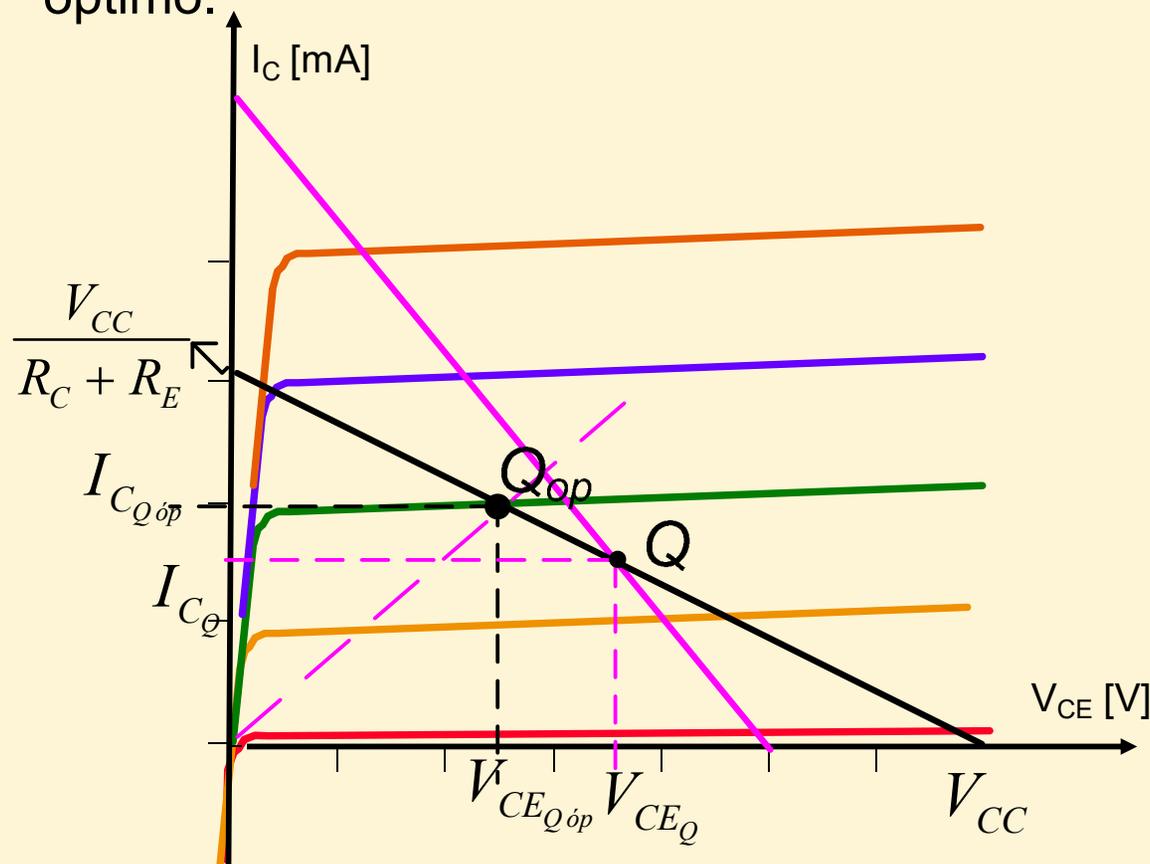
▪ Este concepto se denomina **máxima excursión simétrica** y garantiza el funcionamiento en **clase A (conducción 360°).**

▪ El punto  $Q_{op}$  permitirá una excursión simétrica sin distorsión para la señal de salida.

- El pto  $Q_{op}$ , se puede determina gráficamente o analíticamente
- De ser necesario, se debe corregir el punto encontrado, modificando la corriente de colector
- La corriente de colector se modificará variando resistencias del circuito

### Método para calcular el punto Q óptimo en forma gráfica

- Se dibuja la recta de carga estática.
- Se dibuja la recta de carga dinámica pasando por el origen y con pendiente cambiada de signo.
- Se interseca la recta estática. El punto de intersección es el punto Q óptimo.



- Para el caso ejemplificado gráficamente, es necesario, corregir el punto de operación Q, modificando las resistencias del circuito de forma tal que se modifique la corriente de colector (aumente) y la tensión C-E (disminuya)

Normalmente la potencia en la entrada del circuito, es despreciable frente a la potencia de la de salida.

El valor medio de la potencia será la suma de las potencias que se disipan en cada juntura:

$$p(t) = v_{CE}(t) \cdot i_C(t) + v_{BE}(t) \cdot i_B(t)$$

La potencia instantánea absorbida o entregada por un transistor, al igual que en cualquier otro dispositivo de tres terminales, será:

$$\overline{p(t)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( (v_{CE}(t) \cdot i_C(t) + v_{BE}(t) \cdot i_B(t)) \right) dt$$

$$\overline{p(t)} \cong \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( (v_{CE}(t) \cdot i_C(t)) \right) dt$$

$$\overline{p(t)} \cong \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (v_{CE}(t) \cdot i_C(t)) dt$$

Donde si estamos en la R.A.D:  $i_C = i_c + I_{CQ}$ , y  $v_{CE} = v_{ce} + V_{CEQ}$

Sustituyendo y operando:

$$\overline{p(t)} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} + \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (v_{ce}(t) \cdot i_c(t)) dt$$

Pero:  $\frac{v_{ce}(t)}{i_c(t)} = -R_L$  (Resistencia dinámica de carga  $R_{AC}$ )

Por tanto:

$$\overline{p(t)} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} - \frac{1}{R_L} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (v_{ce}^2(t)) dt$$

$$\overline{p(t)} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} - \frac{1}{R_L} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( v_{ce}^2(t) \right) dt$$

Valor eficaz al cuadrado

O bien:

$$\overline{p(t)} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ} - R_L \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left( i_c^2(t) \right) dt$$

Entonces, la potencia que disipa el transistor es igual al producto de  $I_{CQ} V_{CEQ}$  menos la potencia que se desarrolla sobre la resistencia  $R_c$  debido a la alterna.

Donde:  $I_{CQ} V_{CEQ}$  es la potencia disipada en ausencia de señal (En reposo)

## CONCLUSIÓN IMPORTANTE:

**La potencia disipada por un transistor en la R.A.D es máxima en ausencia de señal y es igual a**

$$P_{dTBJ\text{máx}} = I_{CQ} \cdot V_{CEQ}$$

Muy importante