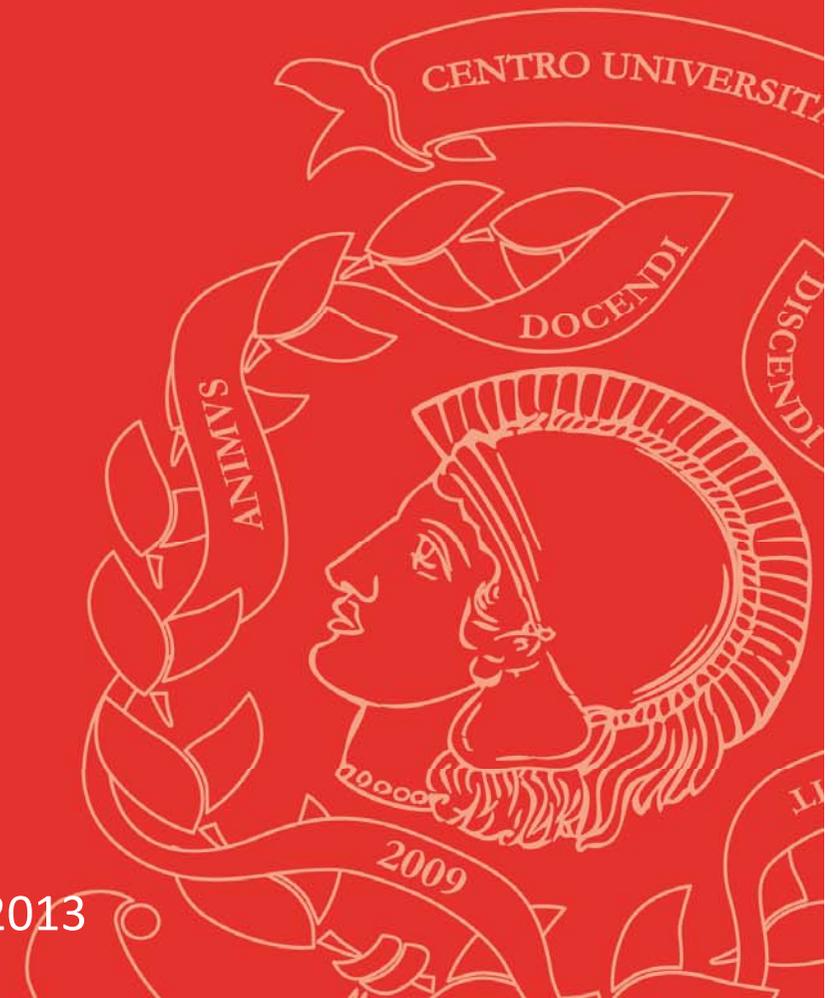




**Centro Universitario  
de la Defensa** Zaragoza

# TRANSISTOR BIPOLAR: TEMA 2.2

Zaragoza, 12 de noviembre de 2013



# TRANSISTOR BIPOLAR

## Tema 2.2

- Polarización
- Modelo de pequeña señal



# TRANSISTOR BIPOLAR

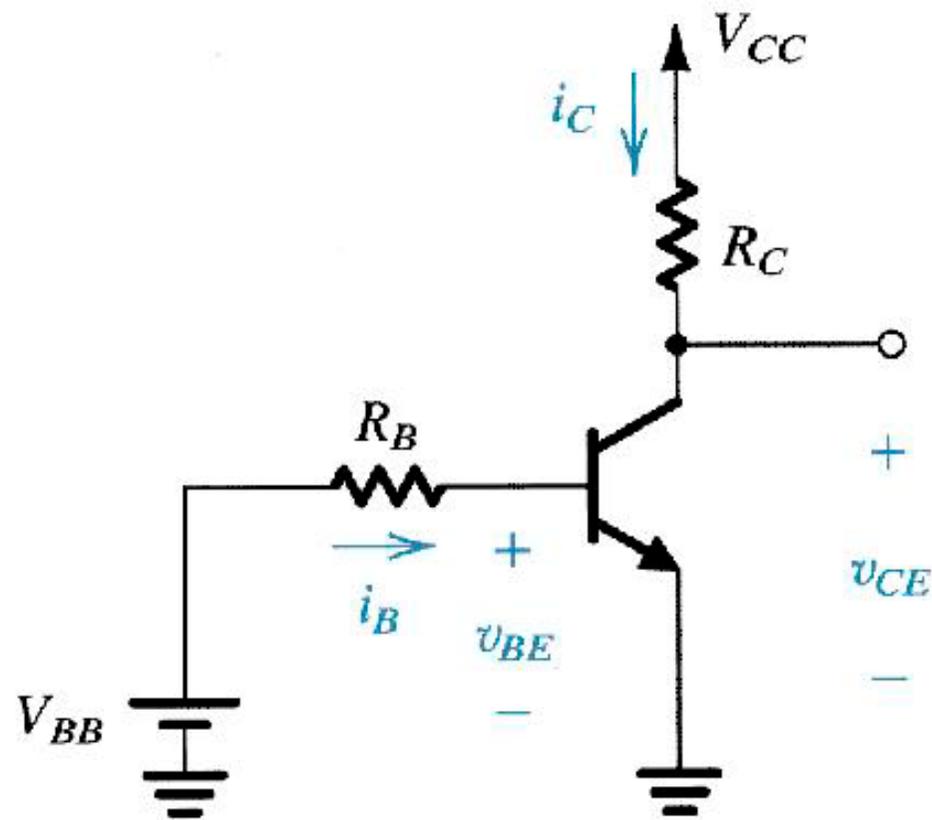
## Tema 2.2

- Polarización
- Modelo de pequeña señal



- Ya hemos visto que un BJT puede trabajar en cuatro regiones de operación diferentes.
- Que lo haga en una u otra depende de las tensiones aplicadas a través de elementos externos (resistencias y fuentes), que fijan el punto de trabajo del transistor (es decir, su polarización).
- Los circuitos de polarización son los encargados de fijar el funcionamiento en continua (DC) del transistor, esto es, el valor de las tensiones aplicadas al BJT y de las corrientes que circulan por él.
- Hay seis variables para fijar: las tensiones entre los terminales ( $v_{CB}$ ,  $v_{BE}$  y  $v_{CE}$ ) y las corrientes que circulan ( $i_B$ ;  $i_C$ ;  $i_E$ ).
- Sólo dos de ellas son independientes puesto que existen cuatro ecuaciones que relacionan estas seis variables: las dos ecuaciones de Ebers-Moll y las dos leyes de Kirchoff.
- Por tanto, basta con imponer externamente dos de estas variables para determinar por completo el punto de polarización del BJT.

- Vamos a ver ahora uno de los circuitos de polarización más sencillos. Además, introduciremos simultáneamente las características de transferencia (relaciones entre las variables, tensiones o corrientes, en el transistor) habitualmente empleadas, tanto para la descripción como para la polarización de un BJT.



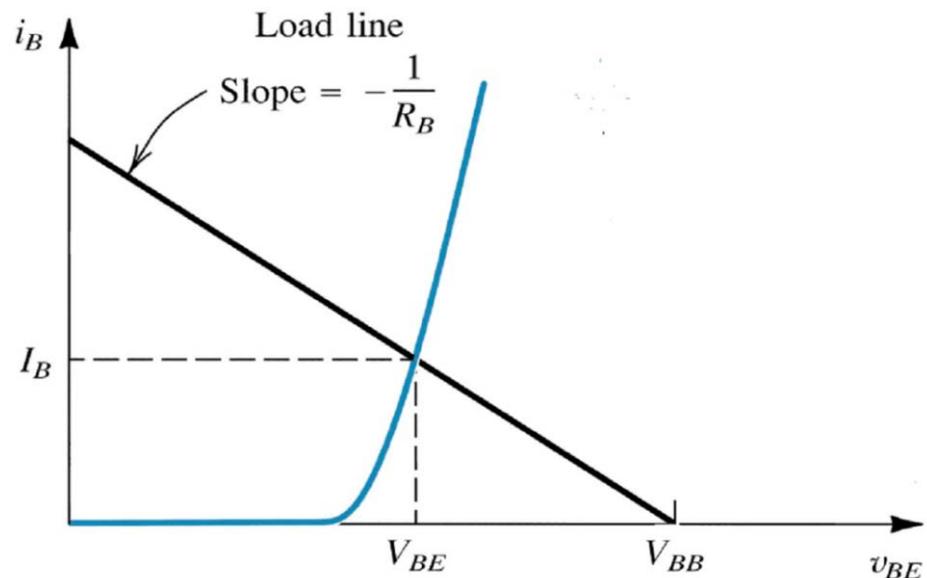
- La malla formada por la fuente  $V_{BB}$ , la resistencia de base ( $R_B$ ) y la unión BE determinan la corriente de base (y, por tanto, la de colector y la de emisor)
- En efecto, la corriente de base y la tensión de base emisor son la solución del siguiente par de ecuaciones (en activa):

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE}$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} (e^{V_{BE}/V_T} - 1)$$



- La solución se puede obtener gráficamente mediante la intersección de la curva característica  $i_B - v_{BE}$  del transistor con la **recta de carga** impuesta por la resistencia  $R_B$  y la fuente  $V_{BB}$



- Para el análisis y diseño a mano no se suele resolver el anterior sistema de ecuaciones, sino que se da un valor fijo a la tensión  $V_{BE}$  ( $\sim 0.6-0.7$  V) y se calcula la corriente de base como:

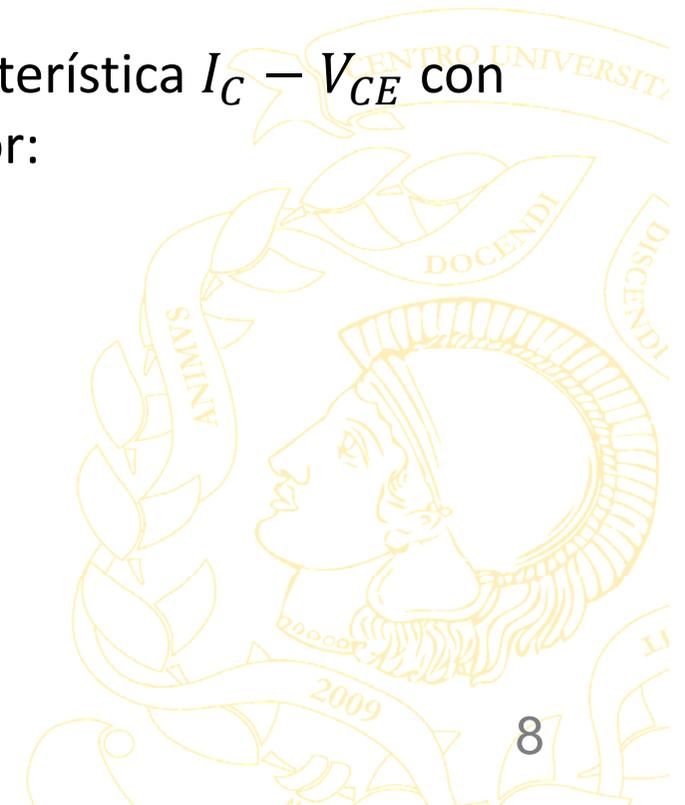
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

- Fijado el valor de  $i_B$ , sólo nos queda un parámetro libre. Se considera entonces la ecuación de malla formada por la alimentación, el colector y el emisor:

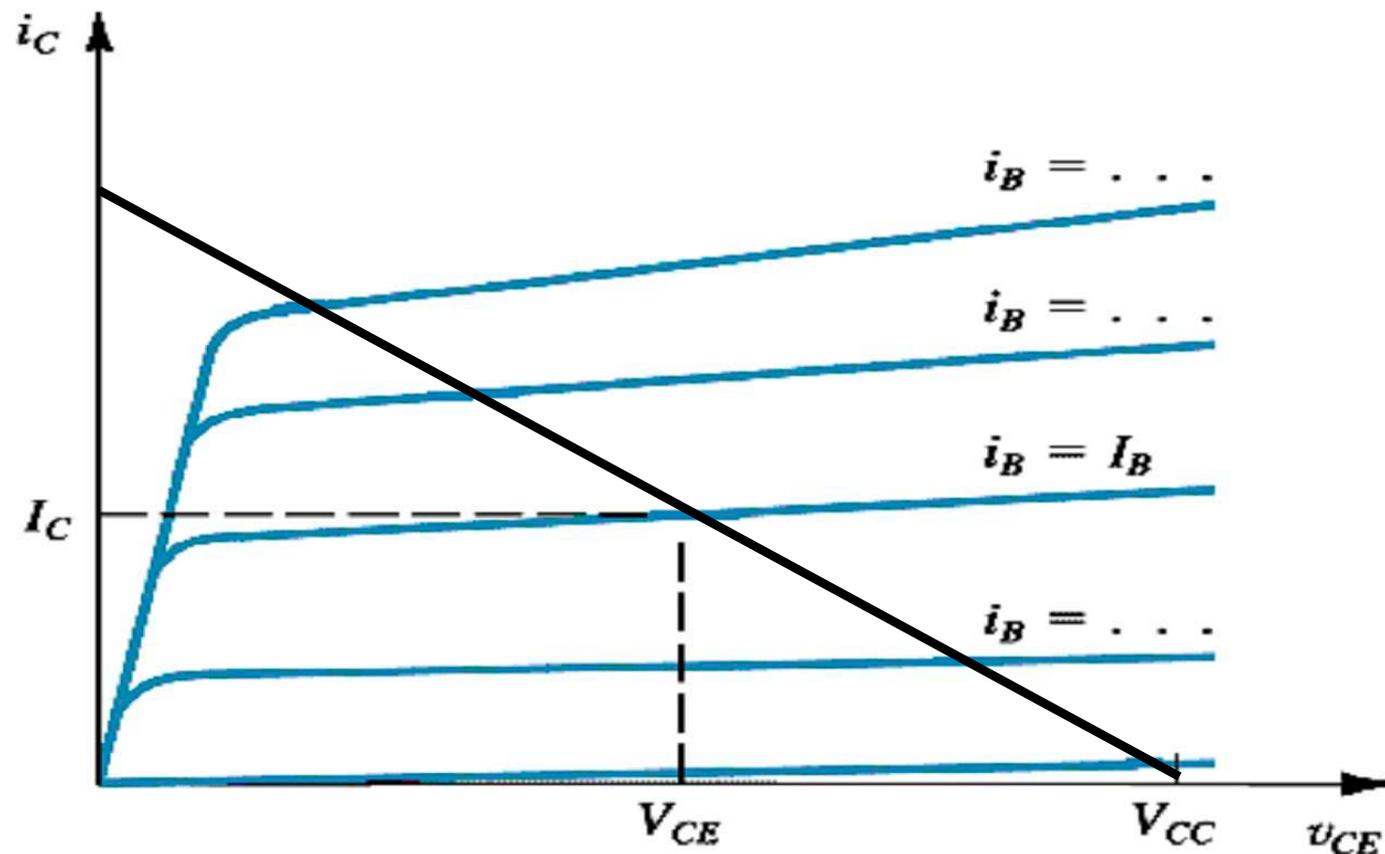
$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

- Por ello, las otras características de transferencia que resultan de interés son las que relacionan  $I_C$  con  $V_{CE}$
- El punto de polarización es la intersección de la característica  $I_C - V_{CE}$  con la recta de carga determinada por la ecuación anterior:

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



- Las características de transferencia  $I_C - V_{CE}$  tienen la forma mostrada en la siguiente figura:



- Cada una de las curvas se corresponde con un valor constante de la intensidad de base ( $I_B$ ) o, lo que es lo mismo, de la tensión  $V_{BE}$ . Para entender por que son así recordemos las ecuaciones de Ebers-Moll:

$$I_E = \frac{I_S}{\alpha_F} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) - I_S (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

$$I_C = I_S (e^{V_{BE}/V_T} - 1) - \frac{I_S}{\alpha_R} (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

- En la región activa:

$$I_E = \frac{I_S}{\alpha_F} (e^{V_{BE}/V_T}); \quad I_C = I_S (e^{V_{BE}/V_T}); \quad I_B = \frac{I_S}{\beta_F} (e^{V_{BE}/V_T})$$

- Como vemos, fijado el valor de  $V_{BE}$  está fijado también el valor de las corrientes que circulan, que son independientes de la tensión en la otra unión ( $V_{BC}$ ) y, por tanto, también de la tensión  $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$ . Por eso, la curva  $I_C - V_{CE}$  es casi plana (tiene una pequeña pendiente debida al Efecto Early).

- Fijado el valor de  $V_{BE}$ , al disminuir el valor de  $V_{CB}$  va cobrando importancia el otro sumando de las ecuaciones de Ebers-Moll, y va disminuyendo el valor de las corrientes de emisor y de colector. Cuando  $V_{CB}$  es igual a cero, estamos en la frontera entre las regiones activa y saturación. Para valores inferiores, la unión CB esta en directo y la tensión  $V_{CE}$  es pequeña. Las regiones activa y saturación están separadas en la gráfica  $I_C - V_{CE}$  por una curva de tipo exponencial. En efecto:

$$V_{CB} = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{BE} \Rightarrow I_C = I_S(e^{V_{BE}/V_T})$$



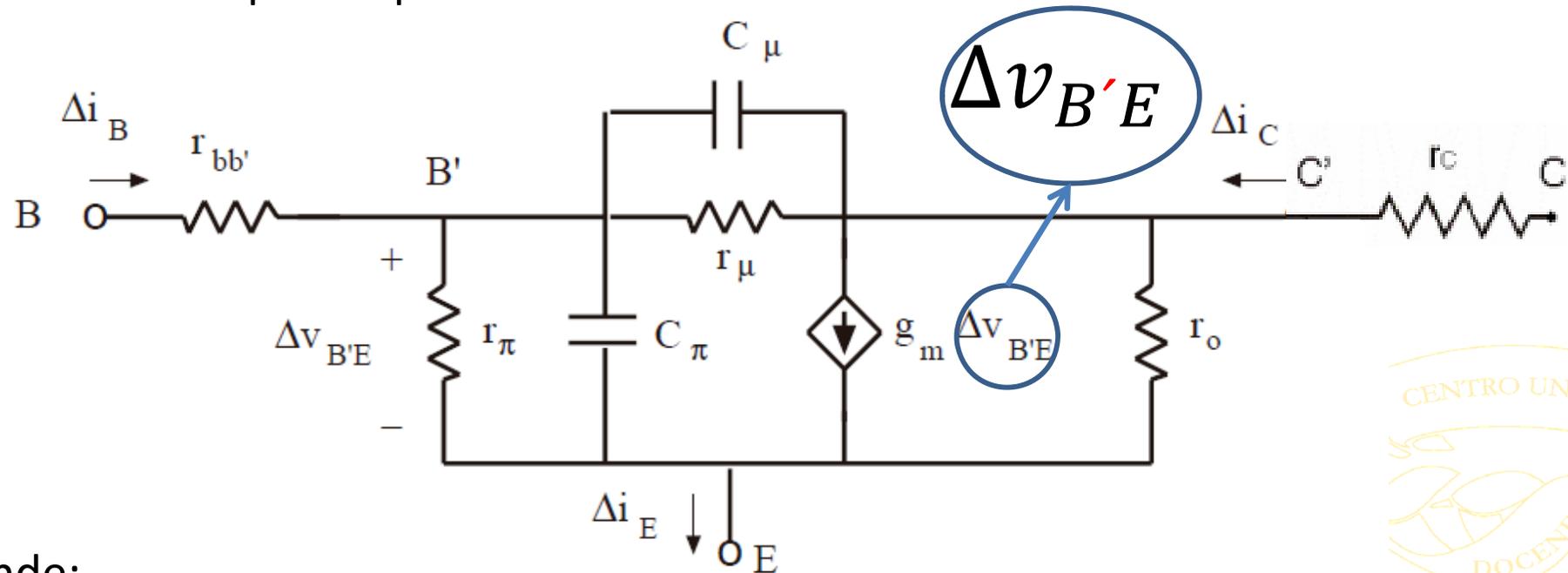
# TRANSISTOR BIPOLAR

## Tema 2.2

- Polarización
- Modelo de pequeña señal



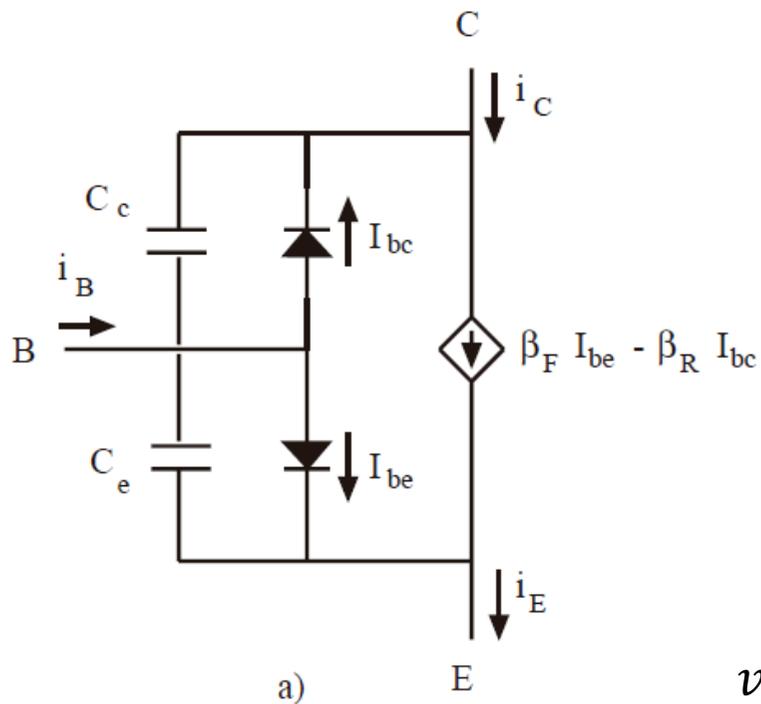
- En la siguiente figura se ilustra el modelo en  $\pi$  de pequeña señal de un transistor bipolar npn en activa:



Donde:

- $r_{bb'}$  y  $r_{cc'}$  ( $50 \Omega$ ) dan cuenta de la caída de tensión desde los terminales del dispositivo hasta la región en donde realmente está el BJT
- $r_{ee'}$  es despreciable porque el terminal de emisor está más próximo a la conexión correspondiente y porque el dopado de emisor es más alto (la resistencia es menor)

- Veamos la procedencia del resto de elementos no capacitivos (que dan cuenta de las variaciones lentas o de baja frecuencia). Supondremos que transistor trabaja en la región activa.



La fuente dependiente de salida:

$$I_{ct} = (\beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc}) \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

se ha incluido el efecto Early

$$v_{BE} = V_{BEQ} + \Delta v_{BE}(t)$$

$$v_{CB} = V_{CBQ} + \Delta v_{CB}(t)$$

Tensión aplicada a las uniones colector y emisora

Valor de polarización

Señal

- La corriente que circula por el diodo conectado entre la base y emisor será:

$$I_{be} = \frac{I_s}{\beta_F} \left[ e^{\frac{V_{BEQ} + \Delta v_{BE}}{V_T}} - 1 \right] = \frac{I_s}{\beta_F} \left[ e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} e^{\frac{\Delta v_{BE}}{V_T}} - 1 \right]$$

$$\cong \frac{I_s}{\beta_F} \left[ e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} \left( 1 + \frac{\Delta v_{BE}}{V_T} \right) - 1 \right]$$

Dos primeros términos del desarrollo de Taylor

$$I_{be} \cong \frac{I_s}{\beta_F} \left[ e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} - 1 \right] + \frac{I_s}{\beta_F} e^{\frac{V_{BEQ}}{V_T}} \frac{\Delta v_{BE}}{V_T} = I_{BQ} + \frac{\Delta v_{BE}}{r_\pi}$$

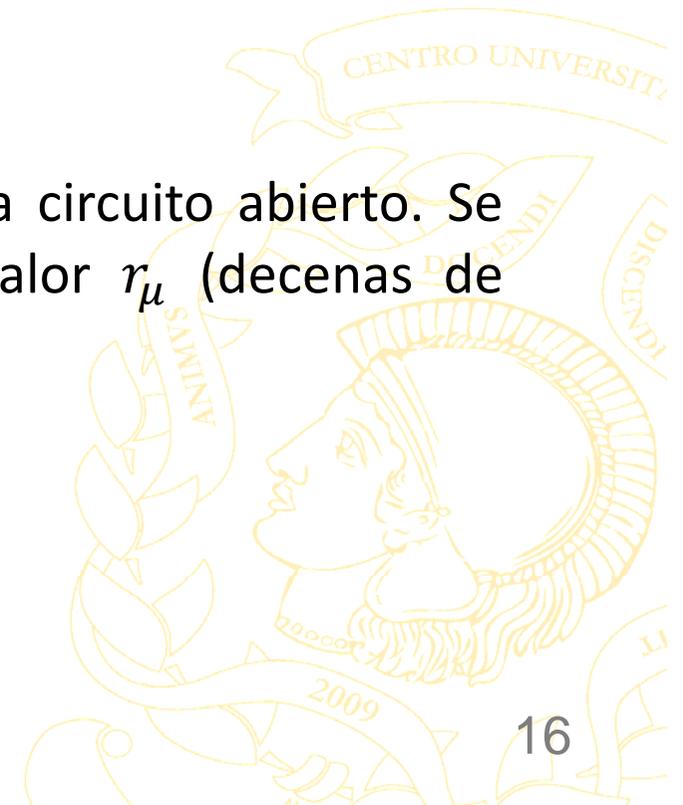
$$I_{bc} \approx 0 \Rightarrow I_{CQ} = \beta_F I_{BQ}$$

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_{BQ}} = \frac{\beta_F V_T}{I_{CQ}}$$

- El incremento de corriente en el diodo conectado entre base y emisor debido a la señal  $\Delta v_{BE}$ , será el mismo que el que habría si, entre estos dos terminales, hubiera conectada una resistencia de valor  $r_{\pi}$

$$I_{be} \cong I_{BQ} + \frac{\Delta v_{BE}}{r_{\pi}}$$

- Región activa => diodo BC en inversa => equivale a circuito abierto. Se suele sustituir por una resistencia de muy alto valor  $r_{\mu}$  (decenas de megaohmios)

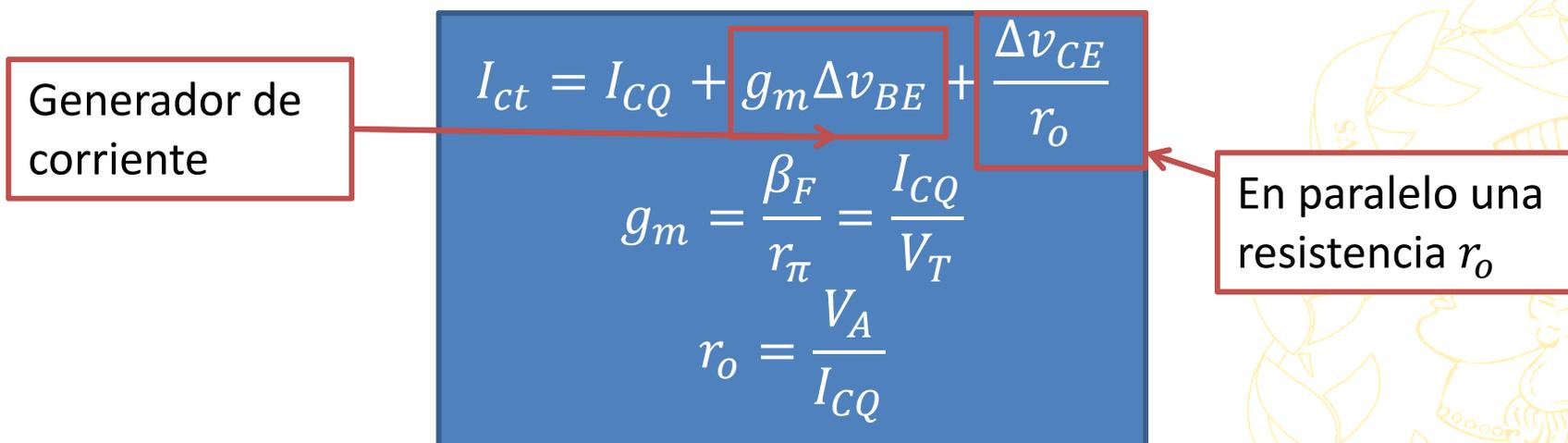


Con la expresión anterior podemos demostrar que la corriente que circulará por la fuente dependiente será:

$$I_{ct} = (\beta_F I_{be} - \beta_R I_{bc}) \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right) \cong \beta_F I_{be} \left( 1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

$$\cong \left( \beta_F I_{BQ} + \beta_F \frac{\Delta v_{BE}}{r_\pi} \right) \left( 1 + \frac{V_{CEQ}}{V_A} + \frac{\Delta v_{CE}}{V_A} \right)$$

Si consideramos que  $V_A \gg V_{CEQ}$  y que los incrementos son muy pequeños:



- $g_m$  reproduce la variación en la corriente de colector causada por un cambio ( $v_{b'e}$ ) en la tensión en la unión BE. Por tanto,  $g_m$  viene dada por:

$$g_m = \frac{\beta_F}{r_\pi} = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

- $r_o$  reproduce la influencia del efecto Early. En efecto:

$$r_o = \frac{V_A}{I_{CQ}}$$



Condensadores del modelo:

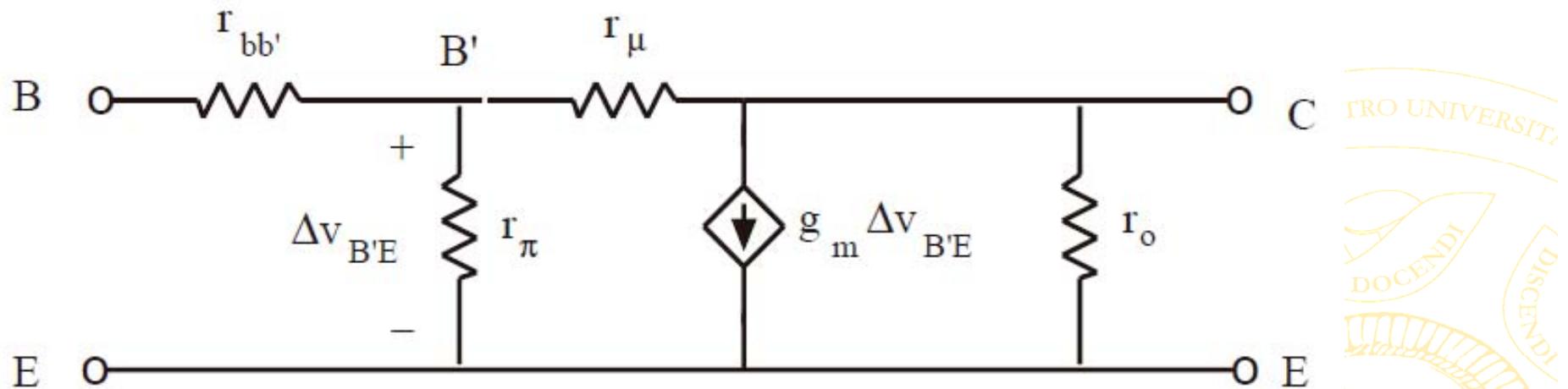
- Finalmente, el comportamiento en frecuencia viene limitado por las capacidades  $C_\pi$  y  $C_\mu$  asociadas a las uniones BE y BC, respectivamente:

$$C_\mu = \frac{C_{JCQ}}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_i}\right)^m}$$
$$C_\pi = \tau_F g_m + \frac{C_{JEQ}}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_i}\right)^m}$$

$\tau_F$  .- tiempo de transito  
m.- parámetro característico  
de la unión

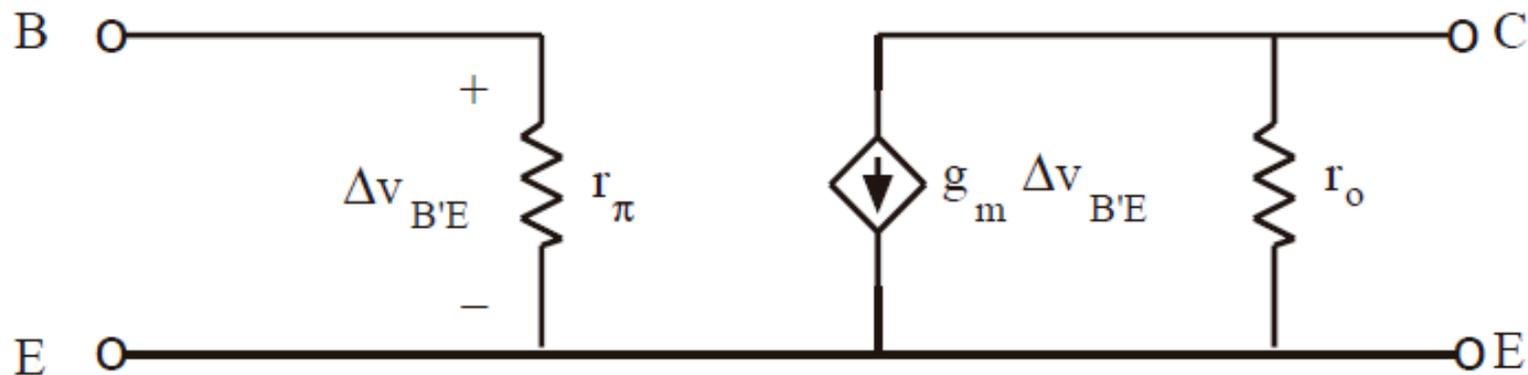
# MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL DE UN BJT BAJAS FRECUENCIAS

- En baja frecuencia las capacidades equivalen a resistencias de muy alto valor. (circuito abierto)



# MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL DE UN BJT BAJAS FRECUENCIAS - SIMPLIFICADO

- La resistencia  $r_{bb'}$  suele tener un bajo valor óhmico y frecuentemente se aproxima por un valor nulo.
- La resistencia  $r_{\mu}$  suele tener un valor muy elevado y se suele despreciar.



- Obsérvese que  $\Delta v_{B'E} = r_{\pi} \Delta i_B \Rightarrow g_m \Delta v_{B'E} = g_m r_{\pi} \Delta i_B$
- La resistencia  $r_o$  suele tener un valor muy elevado y también se suele despreciar.