

# Clase 18<sup>1</sup> - Aplicación de transistores a circuitos analógicos (I)

## AMPLIFICADOR EMISOR COMÚN

### Contenido:

1. Principios Fundamentales de los amplificadores
2. Amplificador Emisor Común
3. Máxima señal sin distorsión
4. Eficiencia de potencia
5. Ejemplo de Emisor Común

### Lectura recomendada:

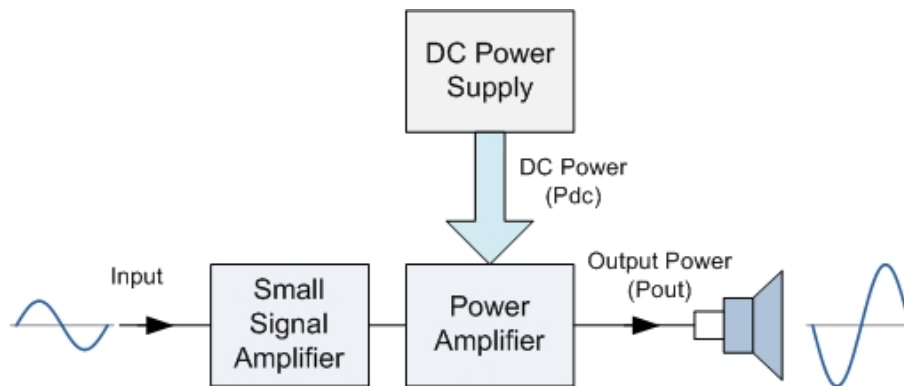
- Gray, Hurst, Lewis, Meyer, “Analysis and Design of Analog Integrated Circuits”, Ch. 3, §§3.1–3.3.
- Sedra, Smith, “Microelectronic Circuits”, Ch. 5 §§5.7.
- Howe, Sodini, “Microelectronics: An Integrated Approach”, Ch. 8, §§8.1–8.2.

---

<sup>1</sup>Esta clase es una adaptación, realizada por los docentes del curso 86.03 – Dispositivos Semiconductores de la FIUBA, de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso 6.012 – Microelectronic Devices and Circuits del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la adaptación.

# 1. Principios fundamentales de los amplificadores

¿Cuál es el objetivo de un amplificador?



El objetivo es convertir potencia de la fuente de alimentación en potencia de señal de salida.

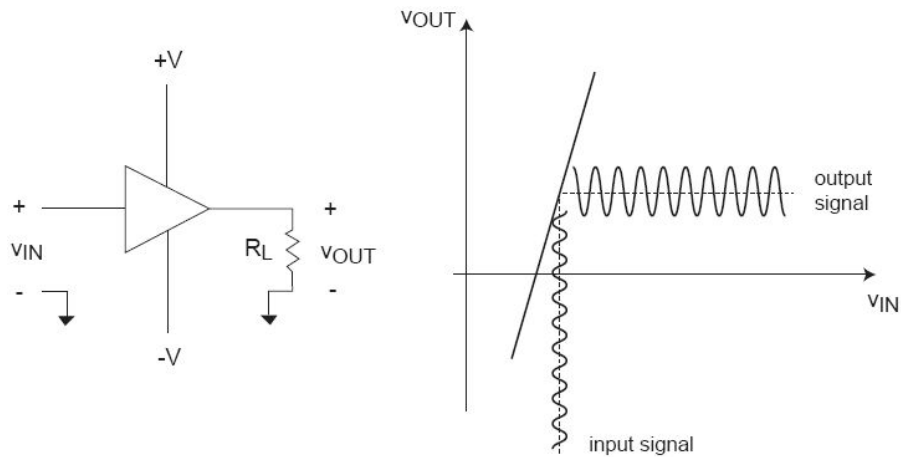
Generalmente tiene tres bloques constitutivos:

- Fuente de alimentación
- Amplificador de pequeña señal ( $\uparrow A_v$  y  $\uparrow R_{IN}$ )
- Amplificador de potencia ( $\uparrow A_i$  y  $\downarrow R_{OUT}$ )

Rendimiento de potencia:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{DC}} \times 100$$

Objetivo de los amplificadores: *amplificación de señal*.



Principales características del amplificador:

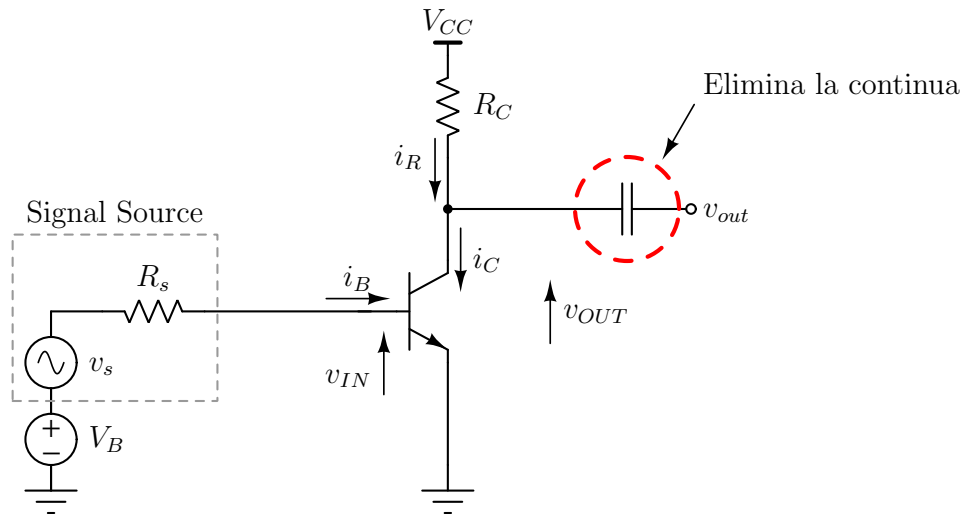
- La *señal de salida* es una réplica sin distorsión de la *señal de entrada*:

$$v_{out} = A_v v_{in}$$

- El amplificador debe tener *relación lineal de transferencia* entrada-salida.

## 2. Amplificador Emisor Común

Consideremos el siguiente amplificador:

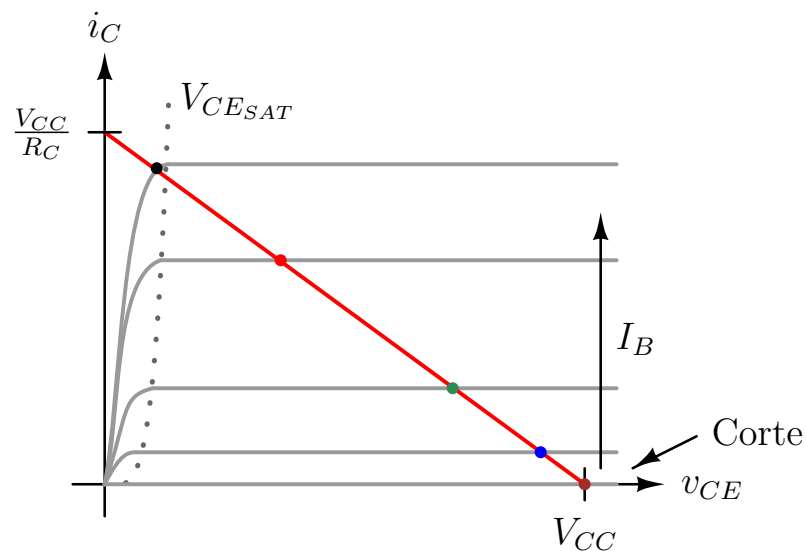


¿Cómo funciona?

- $v_{OUT}(t) = V_{OUT} + v_{out}(t)$ . Prestar atención a la notación:
  - $v_{OUT}(t)$ : Tensión total, depende del tiempo.
  - $V_{OUT}$ : Tensión de continua o polarización, no depende del tiempo.
  - $v_{out}(t)$ : señal alterna, depende del tiempo.
- $V_B$  y  $R_C$  seleccionados para polarizar el transistor en MAD y obtener el *punto Q = Quiescent = Reposo* deseado.

- $v_{BE} \uparrow \Rightarrow i_C \uparrow \Rightarrow i_R \uparrow \Rightarrow v_{OUT} \downarrow$
- $A_{vo} = \frac{v_{out}}{v_{in}} < 0$ ; la salida está en contrafase con la entrada
- $|A_v| = \left| \frac{v_{out}}{v_{in}} \right| > 1$ , si el amplificador está bien diseñado.

Trazamos la recta de carga:



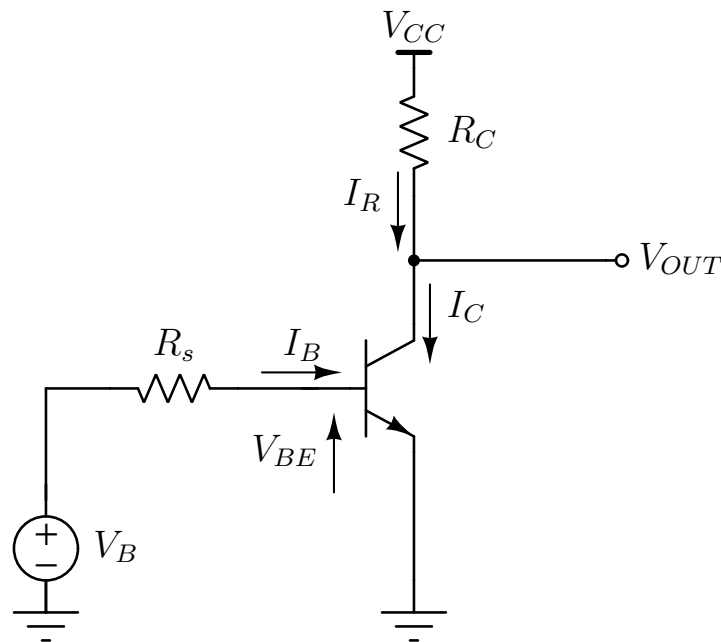
Para los amplificadores es importante conocer:

- El punto de polarización de los transistores
- La máxima señal de salida y entrada sin distorsión
- La ganancia de tensión  $A_{vo}$  del amplificador
- Las resistencias de entrada y salida del amplificador

### □ Punto de polarización

Seleccionamos  $V_B$  y  $R_C$  para que el TBJ esté en MAD y para obtener la tensión  $V_{OUT}$  deseada.

Para el análisis de polarización, se asume que la fuente de señal  $v_s$  se encuentra pasivada, i.e. es un corto circuito, y que los capacitores son circuitos abiertos.



Suponemos que el TBJ está en MAD:

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_s}$$

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{R_C}$$

$$I_C = I_R = \beta \frac{V_B - V_{BE}}{R_s} = \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{R_C}$$

Entonces:

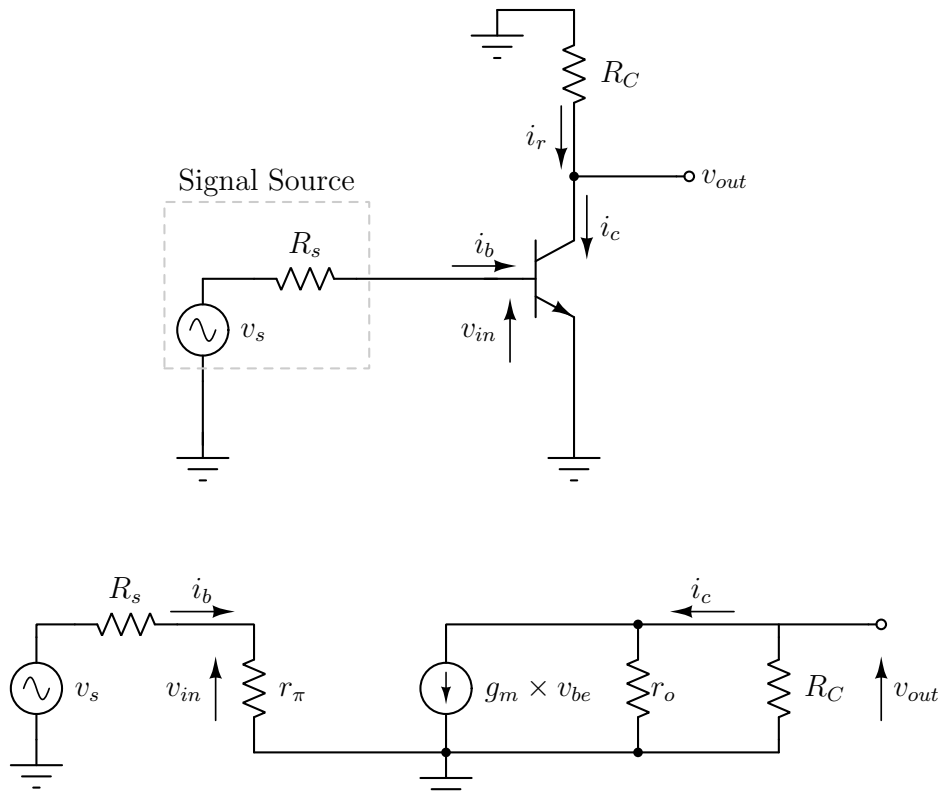
$$V_B = V_{BE} + \frac{R_s V_{CC} - V_{OUT}}{\beta R_C}$$

Finalmente verificamos que el punto Q este en zona de MAD:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C > V_{CE_{sat}} \simeq 0.2 \text{ V}$$

□ *Ganancia de tensión  $A_{vo}$  de pequeña señal*

Pasivamos las fuentes de tensión continua (cortocircuitos) y reemplazamos el transistor por su modelo equivalente de pequeña señal para bajas frecuencias:



$$v_{out} = -g_m v_{in} (r_o // R_C)$$

Luego la *ganancia de tensión sin carga* es:

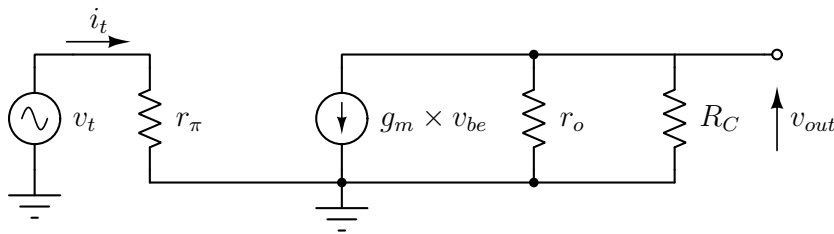
$$A_{vo} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -g_m (r_o // R_C)$$



□ Resistencia de entrada,  $R_{IN}$

● Cálculo de la resistencia de entrada,  $R_{IN}$ :

- Aplicamos una tensión de prueba  $v_t$  en la entrada.
- Calculamos la corriente  $i_t$  resultante.
- Finalmente  $R_{IN} = v_t/i_t$



La tensión  $v_t$  es aplicada directamente en  $v_{be}$ , entonces se enciende el generador controlado.

Sin embargo, la corriente  $g_m \times v_{be}$  no influye en la corriente de prueba  $i_t$ .

Además, al existir  $r_\pi$ ,  $i_t \neq 0$ .

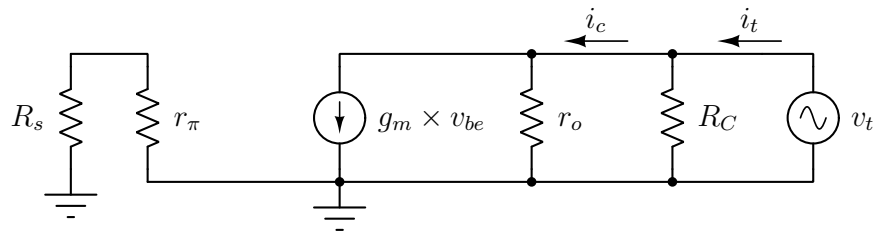
$$\Rightarrow R_{IN} = \frac{v_t}{i_t} = r_\pi$$

Esta es la resistencia de entrada “inherente” al circuito. Puede modificarse si se utilizan resistores para polarizar el circuito.

□ Resistencia de salida,  $R_{OUT}$

● Cálculo de la resistencia de salida,  $R_{OUT}$ :

- Cargamos al amplificador a su entrada con  $R_s$
- Aplicamos una tensión de prueba  $v_t$  en la salida.
- Calculamos la corriente  $i_t$  resultante.
- Calculamos  $R_{OUT} = v_t/i_t$



El generador controlado no se enciende.

$$v_{be} = 0 \Rightarrow g_m v_{be} = 0$$

$$i_t = i_c + \frac{v_t}{R_C} = \frac{v_t}{r_o} + \frac{v_t}{R_C}$$

$$\Rightarrow v_t = i_t (r_o // R_C)$$

$$R_{OUT} = \frac{v_t}{i_t} = r_o // R_C$$

□ *Ganancia de tensión  $A_{vs}$  de pequeña señal*

Se puede también definir la ganancia de tensión respecto de la fuente de señal  $v_s$ :

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{v_{out}}{v_{in}} \frac{v_{in}}{v_s}$$

Para el emisor-común:

$$v_{in} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_s} v_s \Rightarrow \frac{v_{in}}{v_s} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_s}$$
$$\Rightarrow A_{vs} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_s} \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_s} A_{vo}$$

□ *Relación de compromiso de  $A_{vo}$ ,  $R_C$ ,  $V_{CC}$  e  $I_{CQ}$*

Examinemos la dependencia con la polarización:

$$|A_{vo}| = g_m (r_o // R_C) \simeq g_m R_C$$

Reescribimos  $|A_{vo}|$  de la siguiente forma:

$$|A_{vo}| \simeq g_m R_C = \frac{I_C}{V_{th}} \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{I_C} = \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{V_{th}}$$

Para un  $V_{OUT}$  fijo, la ganancia depende sólo de  $V_{CC}$ . Hay que elegir  $I_C$  y  $R_C$  para obtener el  $V_{OUT}$  deseado.

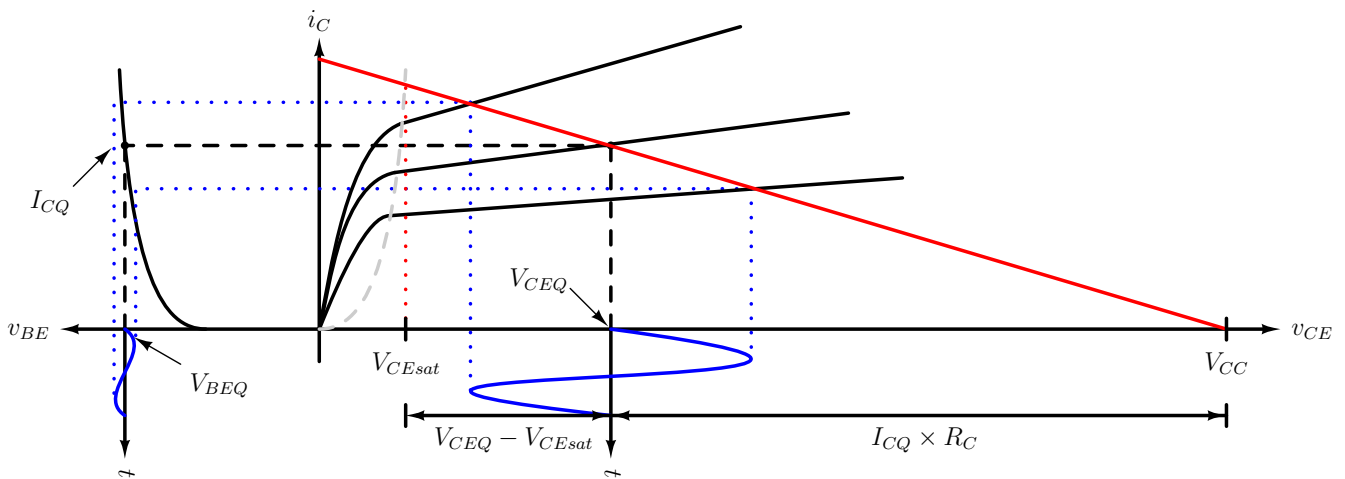
### 3. Máxima señal sin distorsión:

La distorsión ocurre cuando el transistor no está trabajando en el régimen que corresponde.

La relación de la señal de salida con la señal de entrada no será lineal.

Existirá una deformación de la señal de salida y entonces:

$$v_{out} \neq A_{vo}v_{in}$$



□ *Máxima señal de entrada sin distorsión*

- Hay que verificar que  $v_{be}$  se encuentre dentro del rango de validez del modelo de pequeña señal:

$$v_{be} \leq 10 \text{ mV}_{pico}$$

Si no se verifica esta condición el amplificador distorsiona por alinealidad.

□ *Máxima señal de salida sin distorsión*

● Límite superior: para  $v_s$  demasiado negativa el transistor se va al corte, i.e. toda la corriente de señal anula la corriente de polarización

$$\begin{aligned} i_c &= -I_{CQ} \Rightarrow i_C = 0 \\ v_{OUT,max} &= V_{CC} \\ \Rightarrow v_{out,max} &= I_{CQ}R_C = V_{CC} - V_{CEQ} \end{aligned}$$

● Límite inferior: para  $v_s$  muy positiva el TBJ entrará en régimen de saturación. El caso límite tolerable es:

$$\begin{aligned} v_{OUT,min} &= V_{CEsat} \\ \Rightarrow v_{out,max} &= V_{CEQ} - V_{CEsat} \end{aligned}$$

**Atención:** estas son cotas máximas de  $v_{OUT}$ , que se alcancen o no dependerá de  $A_{vo}$  y  $v_{in}$ .

## 4. Eficiencia de conversión de potencia $\eta$

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{DC}} \times 100$$

Donde  $P_{OUT}$  es la potencia eficaz de la señal de salida

$$P_{OUT} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\hat{v}_{out}^2}{R_L}$$

y  $P_{DC}$  es la potencia de continua que consume el circuito.

$$P_{DC} = V_{DD/CC} \cdot I_{D/C}$$

Para un amplificador sin carga ( $R_L \rightarrow \infty$ ), no se entrega potencia a la salida y el rendimiento es nulo.

Si el amplificador entrega potencia a una carga, la máxima eficiencia se obtiene cuando:

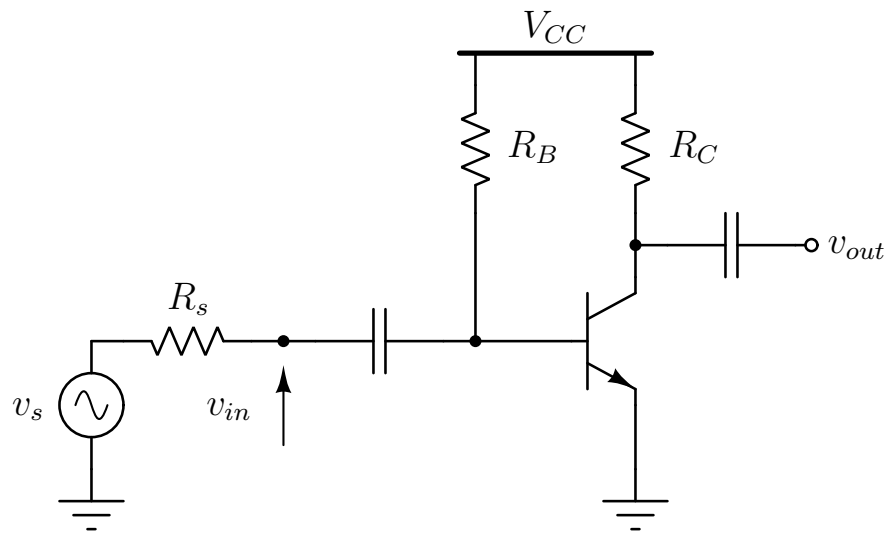
$$v_{out} = v_{out,max} = \frac{1}{2} V_{CC} = I_{CQ} \cdot R_L$$

Entonces (esto vale en general):

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1/2 V_{CC} \cdot I_{CQ} \cdot R_L}{V_{CC} \cdot I_{CQ} \cdot R_L} = 25\%$$

Este 25% es una cota teórica máxima.

## 5. Ejemplo de Emisor Común



**Datos:**

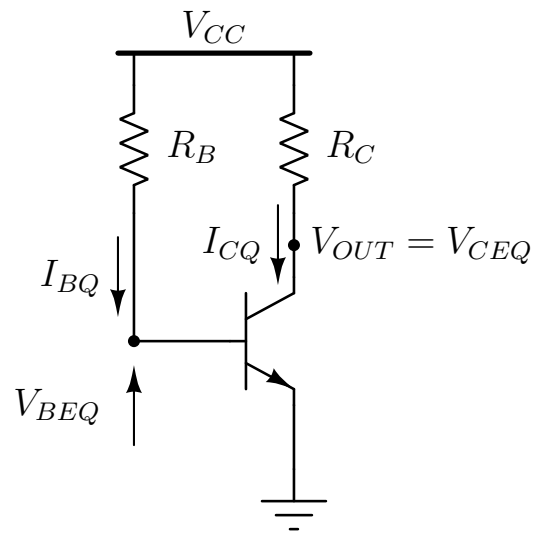
$$V_{CC} = 3.3 \text{ V}, R_B = 100 \text{ k}\Omega, R_C = 75 \Omega,$$

$$\hat{v}_s = 30 \text{ mV}, R_s = 2 \text{ k}\Omega,$$

$$\beta = 750, V_A \rightarrow \infty$$



## Punto de polarización



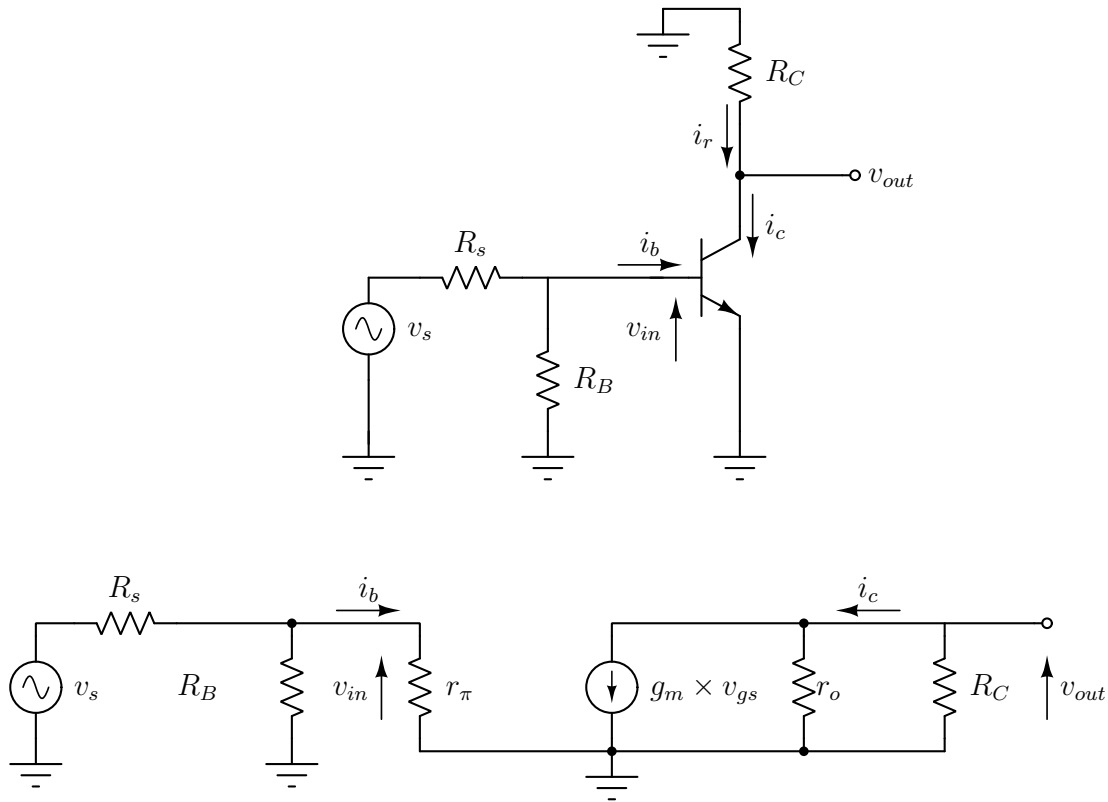
Suponemos M.A.D  $\Rightarrow I_C = \beta I_B$ ,  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $V_{CE} > V_{CE(sat)} = 0.2 \text{ V}$ .

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = 26 \mu\text{A}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 19.5 \text{ mA}$$

$$V_{OUT} = V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 1.8735 \text{ V} > V_{CE(sat)}$$

## Análisis de pequeña señal



Parámetros de pequeña señal del transistor:

$$g_m = \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} = \frac{I_{CQ}}{V_{th}} = 0.75 \text{ S}$$

$$r_\pi = \left( \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right)^{-1} = \frac{\beta}{g_m} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$r_o = \left( \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right)^{-1} = \frac{V_A}{I_{CQ}} \rightarrow \infty$$

Parámetros del amplificador:

$$A_{vo} = \frac{v_{out}}{v_{in}} = g_m (r_o \parallel R_C) = 56.25$$

$$R_{IN} = R_B \parallel r_\pi \simeq r_\pi = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{OUT} = R_C \parallel r_o \simeq R_C = 75 \Omega$$

$$A_{vs} = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_s} A_{vo} = 18.75$$

Resta verificar que el amplificador no distorsione... queda de tarea :)

## Principales conclusiones

- Amplificador Emisor-Común:
  - Resistencia entrada, ganancia de tensión y resistencia de salida "ajustables" con  $R_C$  e  $I_C$ .
  - Excelente amplificador de trasconductancia, Aceptable como amplificador de tensión.
  - Relación de compromiso de  $A_{vo}$ ,  $R_C$ ,  $V_{CC}$ ,  $I_C$  y  $V_{OUT}$ : Superada mediante el uso de fuente de corriente (próxima clase).
- Necesitamos nuevas configuraciones de amplificadores (se estudiarán en materias posteriores):
  - Para salvar relación de compromiso entre  $A_{vo}$  y  $R_{OUT}$
  - Para aquellos casos que se necesite baja  $R_{IN}$