

EL42A - Circuitos Electrónicos

Clase No. 15: Circuitos Amplificadores Lineales (3)

Patricio Parada
pparada@ing.uchile.cl

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile

29 de Septiembre de 2009

Configuraciones para Amplificadores Bipolares

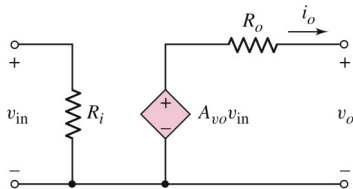
- Configuración de Emisor Común

- Configuración de Colector Común

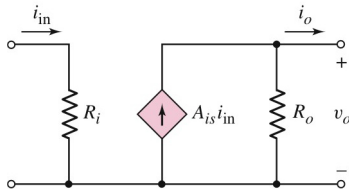
Tipos de Amplificador Bipolar I

- ▶ Nuestra presentación inicial del tema consideró en forma exclusiva la conexión de Emisor Común, para hacer el estudio preliminar de ganancias de voltaje.
- ▶ Sin embargo, como el dispositivo tiene tres terminales, existen otras dos configuraciones posibles: colector común (seguidor de emisor) y base común.
- ▶ Dependiendo del tipo de configuración, vamos a utilizar uno de los siguientes cuatro redes de dos puertas:

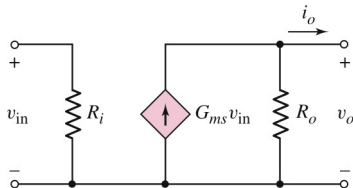
Tipos de Amplificador Bipolar II



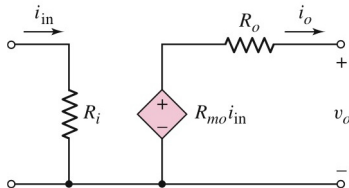
Amplificador de Voltaje



Amplificador de Corriente



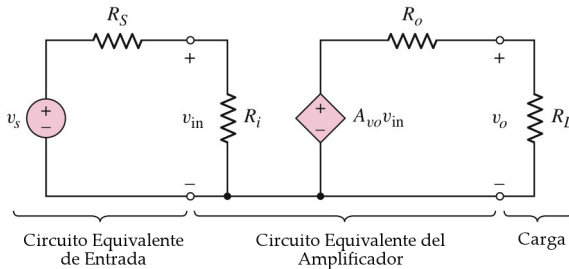
Amplificador de Transconductancia



Amplificador de Transresistencia.

Tipos de Amplificador Bipolar III

- Nuestro problema será determinar las ganancias A_{vo} , A_{is} , G_{ms} y R_{mo} para cada uno de los tres tipos de amplificadores.
- En una aplicación típica de amplificación de voltaje, como la mostrada en la figura



Tipos de Amplificador Bipolar III

- El voltaje de entrada del amplificador es

$$v_{in} = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s. \quad (1a)$$

- Similarmente, el voltaje en la carga es

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{vo} v_{in} \\ &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{vo} v_s \end{aligned} \quad (1b)$$

- Por lo tanto, la ganancia real del circuito amplificador decae respecto del valor nominal A_{vo} .

Tipos de Amplificador Bipolar IV

- Para poder tener $A_v \approx A_{vo}$ deben cumplirse dos condiciones:

$$R_s \ll R_i \quad \text{y} \quad R_o \ll R_L.$$

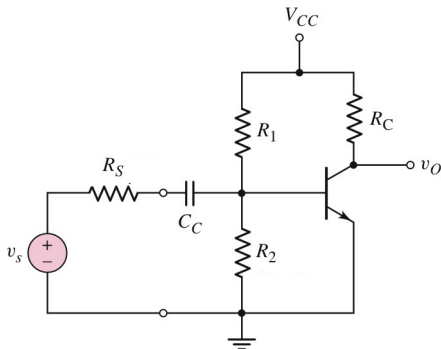
- En el caso de un amplificador de corriente, como el mostrado en la figura 1, queremos que

$$R_s \gg R_i \quad \text{y} \quad R_o \gg R_L.$$

- Vamos a ver que cada de las tres configuraciones se ajusta distintos requerimientos, y por lo tanto, lo hará más adecuado para una aplicación en particular.

Configuración de Emisor Común I

- ▶ Es la configuración que hemos utilizado más durante este curso, y es una de las más típicas para realizar amplificación de voltaje.
- ▶ La configuración básica (incluyendo polarización) se muestra en la figura



Configuración de Emisor Común II

- La señal $v_s(t)$ se acopla al amplificador mediante el condensador de acoplamiento C_C , que provee de aislación DC entre la señal de entrada y el resto del circuito.
- Notemos que la impedancia del condensador es

$$|Z_C| = \frac{1}{2\pi f C_C}$$

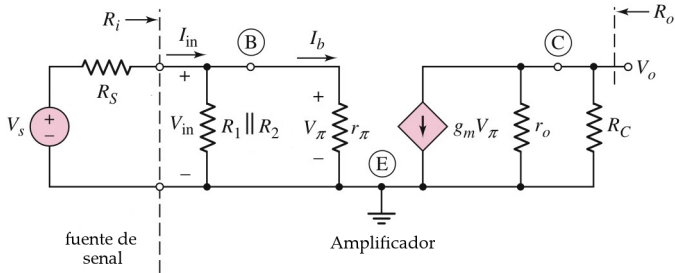
para una frecuencia de operación f .

- Si $C_C = 10 \mu\text{F}$, podemos ver que la impedancia equivalente es

f [Hz]	$ Z_C $ [Ω]
2	8k
2 k	8
2 M	8 m
2 G	8 μ

Configuración de Emisor Común III

- Notamos que para frecuencias relativamente del orden de los mega Hertz la impedancia asociada al condensador de acoplamiento se hace despreciable, y se puede considerar un cortocircuito.
- El circuito equivalente para señal pequeña es



Características del Amplificador en Emisor Común I

- La ganancia de amplificación de voltaje es

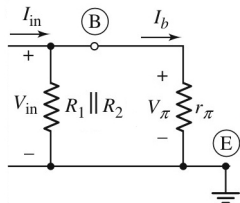
$$A_v = -g_m(R_C \parallel r_o) \frac{r_\pi \parallel R_1 \parallel R_2}{R_s + r_\pi \parallel R_1 \parallel R_2}. \quad (2)$$

- ¿Cuánto vale la impedancia de entrada del amplificador?

$$R_i \equiv \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_o=0}$$

- Notamos directamente que $V_\pi = V_{in}$ y que

$$I_{in} = \frac{V_\pi}{r_\pi \parallel R_1 \parallel R_2}$$



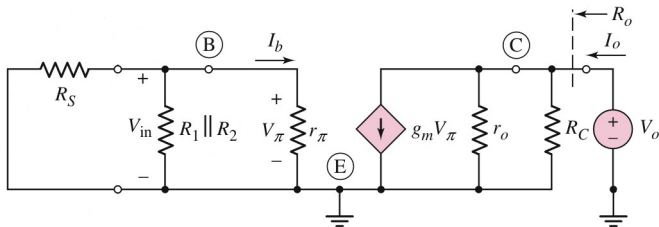
por lo que podemos identificar la impedancia de entrada como

$$R_i = r_\pi \parallel R_1 \parallel R_2. \quad (3)$$

Características del Amplificador en Emisor Común II

- La impedancia de salida del amplificador se determina evaluando

$$R_o \equiv \left. \frac{V_o}{I_o} \right|_{V_s=0}$$



- En este caso $V_{\pi} = 0$ y

$$R_o = R_C \parallel r_o. \quad (4)$$

Observación

Si R_i es comparable con R_s (es decir, no es suficientemente grande),

$$V_{in} = \frac{R_i}{R_s + R_i} V_s$$

puede ser considerablemente menor a $|V_s|$. Esto es llamado efecto de carga (*loading effect*) en el amplificador.

Amplificador de Emisor Común Mejorado I

- El circuito de emisor común recién analizado tiene problemas de estabilidad de polarización que lo pueden sacar fácilmente de la región activa.
- Notamos que el voltaje CE es

$$V_{CE} = \left(1 - \beta \frac{R_C}{R_1}\right) V_{CC} + \beta \frac{R_C}{R_1 \parallel R_2} V_{BE(\text{on})}.$$

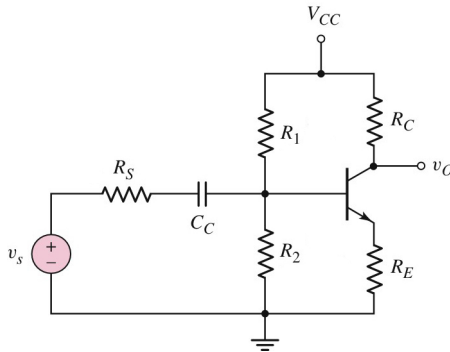
- Por lo tanto, una pequeña variación en $V_{BE(\text{on})}$ puede saturar el transistor:

$$\frac{\partial V_{CE}}{\partial V_{BE(\text{on})}} = \beta \frac{R_C}{R_1 \parallel R_2}.$$

- Si $R_C = 10 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, y $\beta = 100$ tenemos que la variación del voltaje CE es de 20 veces la variación de $V_{BE(\text{on})}$. Si $\Delta V_{BE(\text{on})} = -0,1 \text{ V}$, entonces V_{CE} decae 2 V!!!

Amplificador de Emisor Común Mejorado II

- El punto de operación puede ser estabilizado incorporando una resistencia entre el emisor y tierra.



Amplificador de Emisor Común Mejorado III

- En este caso,

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}(\text{on})}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

y

$$V_{CE} = (R_C + (1 + \beta)R_E)I_B + V_{BE}(\text{on}).$$

donde $R_B = R_1 \parallel R_2$ y $V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_{CC}$.

- Calculemos la sensibilidad del punto de operación con respecto a $V_{BE}(\text{on})$ y β .

$$V_{CE} = V_{CC} - \frac{\beta R_C + (1 + \beta)R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} [V_{BB} - V_{BE}(\text{on})]$$
$$\frac{\partial V_{CE}}{\partial V_{BE}(\text{on})} = \frac{\beta R_C + (1 + \beta)R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

- Notamos que a medida que β crece, la variación entre V_{CE} y $V_{BE}(\text{on})$ se hace constante:

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{\partial V_{CE}}{\partial V_{BE}(\text{on})} = \frac{R_C + R_E}{R_E}$$

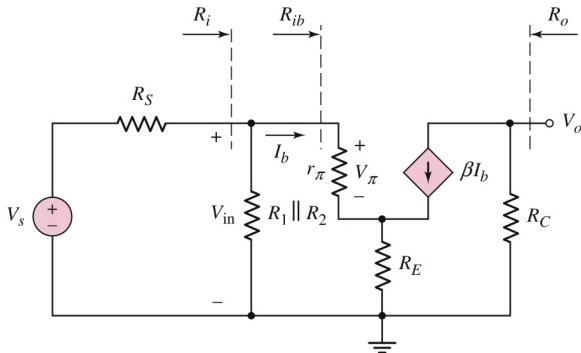
- La sensibilidad del punto de operación respecto de β se puede determinar de

$$\frac{\partial V_{CE}}{\partial \beta} = \frac{R_C(R_E + R_B) + R_E R_B}{(R_B + (1 + \beta)R_E)^2} [V_{BE}(\text{on}) - V_{BB}]$$

A medida que β crece, el punto de operación se vuelve insensible con respecto a β .

Ganancia de Voltaje del Amplificador de Emisor Común (Revisita) I

- El circuito equivalente para señal pequeña es



Ganancia de Voltaje del Amplificador de Emisor Común (Revisita) II

- La resistencia de entrada R_i se puede determinar notando que

$$V_{in} = [r_{\pi} + (1 + \beta)R_E]I_b$$

- Por otro lado

$$\begin{aligned} I_{in} &= \frac{V_{in}}{R_1 \parallel R_2} + I_b \\ &= \frac{V_{in}}{R_1 \parallel R_2} + \frac{V_{in}}{r_{\pi} + (1 + \beta)R_E} \end{aligned}$$

- Así obtenemos,

$$\begin{aligned} R_i &= \left. \frac{V_{in}}{I_{in}} \right|_{I_o=0} \\ &= R_1 \parallel R_2 \parallel [r_{\pi} + (1 + \beta)R_E]. \end{aligned} \tag{5}$$

Ganancia de Voltaje del Amplificador de Emisor Común (Revisita) III

- La ganancia de voltaje la podemos determinar notando que

$$V_{in} = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_s + R_1 \parallel R_2} V_s$$

- Por otro lado

$$V_{in} = \frac{r_{\pi} + (1 + \beta)R_E}{r_{\pi}} V_{\pi}$$

y

$$V_o = -\frac{\beta}{r_{\pi}} R_C V_{\pi}.$$

- Obtenemos la ganancia de voltaje nominal (interna, sin considerar el circuito de entrada)

$$A_{vo} = \frac{-\beta R_C}{r_{\pi} + (1 + \beta)R_E}. \quad (6)$$

Ganancia de Voltaje del Amplificador de Emisor Común (Revisita) IV

$$A_{vo} = \frac{-R_C}{\frac{r_\pi}{\beta} + \frac{1 + \beta}{\beta} R_E}. \quad (7)$$

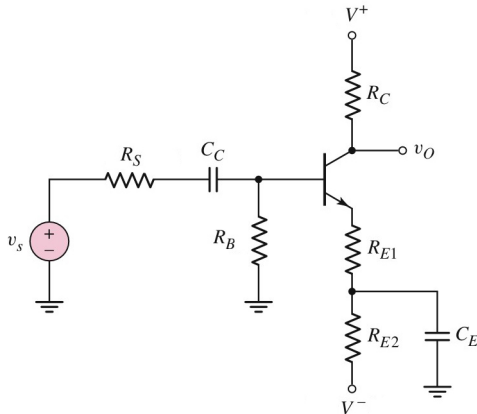
- Reordenando términos es fácil ver que a medida que $\beta \rightarrow \infty$,

$$A_{vo} \rightarrow -\frac{R_C}{R_E}. \quad (8)$$

- En este caso, el diseño del circuito permite mayor estabilidad tanto en el punto de operación como en la ganancia de voltaje de señal pequeña.
- El costo de esta operación es una menor ganancia de voltaje.
- Notamos que la ganancia de voltaje también es función de las resistencias del circuito, por lo que debe considerarse el efecto de utilizar resistencias reales (con cierta tolerancia) en el diseño final del circuito.

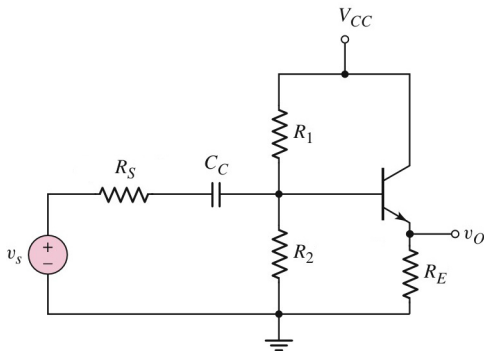
Incorporación de Condensador de Bypass C_E

- ▶ En algunas ocasiones, la incorporación de R_E puede provocar una caída considerable en la ganancia de amplificación de voltaje.
- ▶ Es por ello que se puede utilizar un condensador C_E conectado en paralelo a R_E que la cortocircuite para efectos de la señal pequeña.

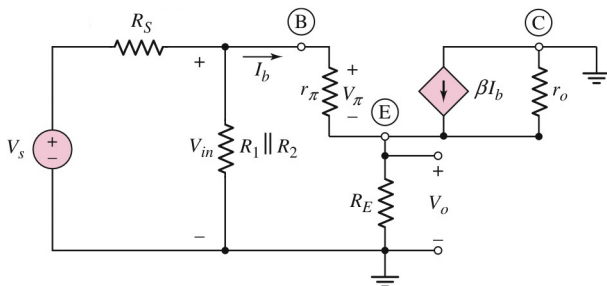


Amplificador de Colector Común

- ▶ En amplificador de colector común la salida es tomada en el terminal de emisor.
- ▶ A veces recibe el nombre de configuración seguidora de emisor.
- ▶ El análisis DC es el mismo que en circuitos de emisor común, por lo que nos concentraremos en la componente AC de la operación del circuito.



Modelo para Señal Pequeña I



► Notamos que

$$V_o = \underbrace{(1 + \beta)I_b}_{I_e} (R_E \parallel r_o)$$

y

$$V_{in} = [r_\pi + (1 + \beta)(R_E \parallel r_o)]I_b$$

- Luego,

$$A_{vo} = \frac{(1 + \beta)(R_E \parallel r_o)}{r_\pi + (1 + \beta)R_E \parallel r_o} \quad (9)$$

- Notamos inmediatamente que si $r_\pi \ll (1 + \beta)(r_o \parallel R_E)$, la ganancia de voltaje es aproximadamente 1. Luego, el voltaje de salida será relativamente cercano al de entrada. Esto origina el nombre **seguidor de emisor**.
- La resistencia de entrada es

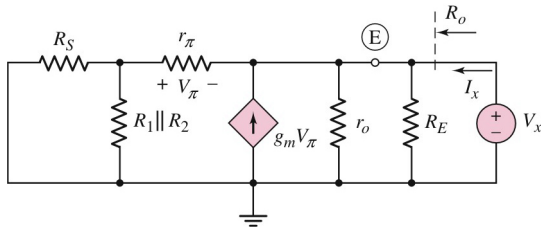
$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{ib} \quad (10)$$

donde R_{ib} se calcula a partir de

$$R_{ib} = \left. \frac{V_{in}}{I_b} \right|_{I_o=0} = r_\pi + (1 + \beta)(R_E \parallel r_o) \quad (11)$$

Modelo para Señal Pequeña III

- La impedancia de entrada se ve dominada por el término $(1 + \beta)R_E$, al igual que en la configuración de emisor común. Este efecto recibe el nombre de **regla de reflexión de resistencias**.
- La impedancia de salida la podemos calcular apoyándonos en el siguiente circuito



Modelo para Señal Pequeña IV

- La impedancia de salida es

$$R_o = \frac{V_x}{I_x}$$

- Notamos que

$$I_x + g_m V_\pi = \frac{V_x}{r_o \parallel R_E} + \frac{V_x}{r_\pi + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}.$$

y

$$V_\pi = -\frac{r_\pi}{r_\pi + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s} V_x$$

- Reemplazando obtenemos

$$R_o = \left(\frac{r_\pi + R_1 \parallel R_2 \parallel R_s}{1 + \beta} \right) \parallel R_E \parallel r_o. \quad (12)$$

- ▶ Esta configuración tiene una impedancia de entrada grande y una de salida pequeña, lo que en conjunto con una ganancia de voltaje casi igual a 1, lo convierte en una fuente de voltaje ideal.
- ▶ Este circuito a veces recibe el calificativo de transformador de impedancias, y es útil en la etapa de salida de un amplificador.
- ▶ La **ganancia de corriente** del circuito la podemos determinar a partir del mismo circuito de pequeña señal visto originalmente:
- ▶ Tenemos que en el nodo (B)

$$I_b = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_{ib} + R_1 \parallel R_2} I_{in} \quad (13)$$

Esto se debe al divisor de corriente que aparece en forma natural en el nodo.

- En el nodo (E) podemos escribir el divisor de corrientes:

$$I_o = \frac{r_o}{r_o + R_E} I_x \quad (14)$$

- Como $I_o = (1 + \beta)I_b$, entonces

$$A_i \equiv \frac{I_x}{I_{in}} = (1 + \beta) \left(\frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_{ib}} \right) \frac{r_o}{r_o + R_E}. \quad (15)$$