

Electrónica de Circuitos

3º Ingeniería de Telecomunicaciones — UPV/EHU

"Under-promise and over-deliver."

Javier de Martín – 2016/17

Transistor BJT

Parámetros

$h_{ix}(\Omega)$: Impedancia de entrada

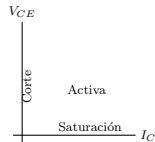
h_{rx} : Reverse voltage ratio

h_{fx} : Forward current transfer ratio

$h_{ox}(\Omega^{-1})$: Admitancia de salida

Base Común	Emisor Común	Colector Común
$h_{ib} = \frac{v_{eb}}{i_e} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{ie} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{ic} = \frac{v_{bc}}{i_b} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$
$h_{rb} = \frac{v_{eb}}{v_{cb}} = \frac{v_{be}}{v_{ce}} = \frac{v_{be}}{v_{bc}}$	$h_{re} = \frac{v_{be}}{v_{ce}} = \frac{v_{be}}{v_{bc}}$	$h_{rc} = \frac{v_{bc}}{v_{ce}} = \frac{v_{be}}{v_{ce}}$
$h_{fb} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{i_b}{i_b} = \frac{i_b}{i_b}$	$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{i_b}{i_b} = \frac{i_b}{i_b}$	$h_{fc} = \frac{i_e}{i_b} = \frac{i_b}{i_b} = \frac{i_b}{i_b}$
$h_{ob} = \frac{i_c}{v_{cb}} = \frac{i_b}{v_{ce}} = \frac{i_b}{v_{bc}}$	$h_{oe} = \frac{i_c}{v_{ce}} = \frac{i_b}{v_{bc}}$	$h_{oc} = \frac{i_e}{v_{ce}} = \frac{i_b}{v_{bc}}$

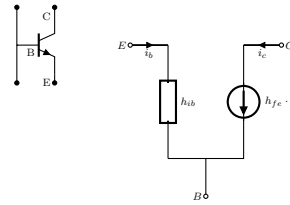
Regiones Operativas



- **Región Activa:** La corriente de colector I_C depende directamente de la corriente de base I_B , de la ganancia de corriente β y de las resistencias conectadas al colector y emisor. En esta región se produce amplificación de la señal.
- **Región Inversa:**
- **Región de Saturación:** La corriente $I_C = I_E = I_{max}$. La corriente depende del voltaje de alimentación del circuito y de las resistencias conectadas al colector y emisor. Este modo aparece cuando la corriente de base es lo suficientemente grande como para inducir una corriente de colector β veces más grande.
- **Región de Corte:** La corriente $I_C = I_E = 0$. El voltaje V_{CE} es el de alimentación del circuito, al no haber corriente circulando no hay caída tensión. Este modo aparece, normalmente, cuando $I_B = 0$.

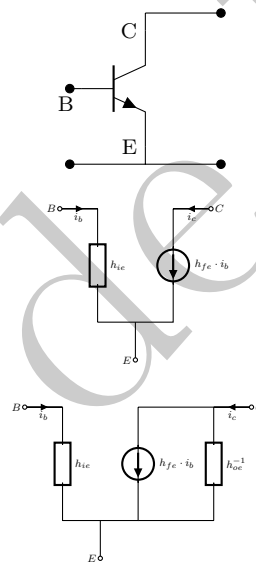
Configuraciones de Montaje

Base Común



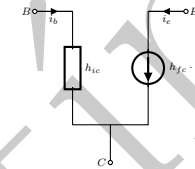
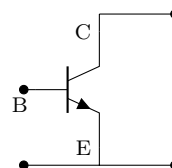
- Baja impedancia de entrada.
- Alta impedancia de salida
- Ganancia unidad, o menor, de corriente.
- Ganancia alta de tensión.

Emisor Común



- Impedancia de entrada media.
- Impedancia de salida media.
- Alta ganancia de corriente.
- Alta ganancia de tensión.

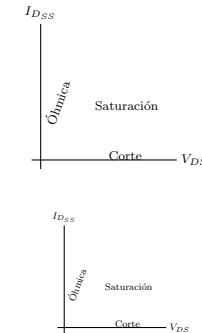
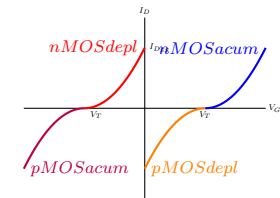
Colector Común



- Alta impedancia de entrada.
- Muy baja impedancia de salida.
- Alta ganancia de corriente.
- Unidad, o menor, ganancia de tensión.

Transistor FET

$$g_m = \frac{2}{|G_{GSOFF}|} \sqrt{I_D \cdot I_{DSS}}$$



Resolución de Ejercicios

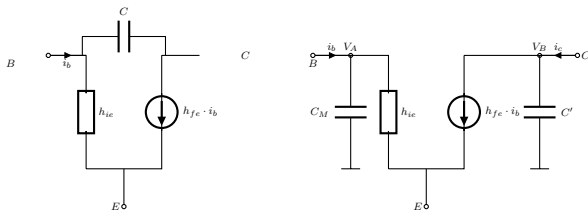
Puntos de Polarización

1. Poner v_i , y a veces v_o , a cero voltios.
2. Buscar rama de diferencial → Corriente de referencia.

Pequeña Señal

1. Localizar entradas inversora y no inversora.
 - Modo Diferencial → $v_i/2$ y puntos de unión a tierra.
 - Modo Común → v_i y puntos de unión mediante R a tierra.

Condensador entre dos patas de un BJT.



$$C_M = C \left(1 - \frac{V_B}{V_A}\right) \quad C = C \left(1 - \frac{V_A}{V_B}\right)$$

Impedancias de Entrada y Salida

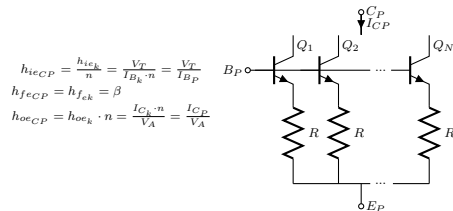
Factor de Rechazo al Modo Común

$$\text{CMRR} = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{g_D}{g_C} \right|$$

Para mejorar CMRR → disminuir la ganancia en el modo común → incrementar R_E . Sustituir las resistencias por cargas activas (fuentes de corriente que en alterna se comportan como resistencias).

1. Etapas de Dos Transistores

Configuración en Paralelo

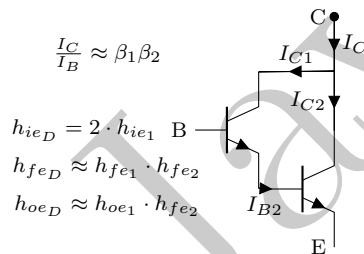


Se comporta como **un único transistor**, necesita una resistencia R (*ballast resistor*) para estabilizar el reparto de corriente entre los transistores. Permite trabajar en **altas corrientes**.

Las resistencias de emisor permiten estabilizar el circuito tensión.

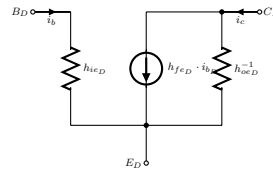
$$I_{CN} = \frac{I_{CP}}{N} \quad V_{BE_N} + I_{C_N}$$

Configuración Darlington



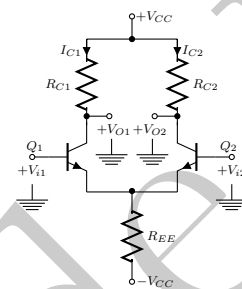
$$h_{ieD} = h_{ie1}(1 + h_{fe1}) \cdot h_{ie2}$$

Gran ganancia de corriente pero baja impedancia de salida. Las fugas del primer transistor son amplificadas por el segundo, sólo es aconsejable en agrupaciones de 2 transistores.



$$\beta_T \approx \beta_1 \cdot \beta_2 \approx \frac{I_C}{I_B}$$

Amplificador Diferencial



Amplificador de continua, simétrico con 2 entradas y 2 salidas. Amplifica exclusivamente la diferencia de sus entradas: $V_O = k \cdot (V_{i1} - V_{i2})$. Tiene los siguientes modos de funcionamiento:

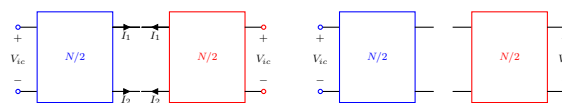
- **Salida Diferencial:** La señal de salida se toma entre las salidas de cada semi-red ($V_O = V_{O1} - V_{O2}$).
- **Salida Asimétrica:** La señal de salida se toma de la salida de una semi-red ($V_O = V_{Ox}$). Para este modo es necesaria una R_{EE} elevada.

Tiene efectos parásitos como las **corrientes de polarización** que provocan caídas de tensión en las resistencias internas de las fuentes de señal a amplificar.

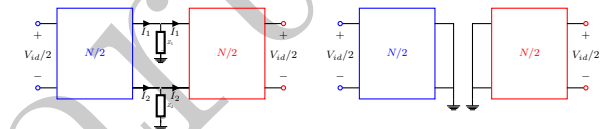
Mirar página 23— salida simétrica y tal

Teorema de Bartlett

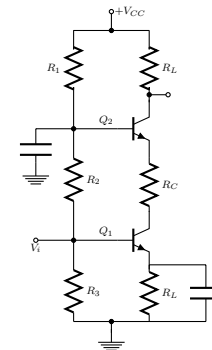
Simplifica el análisis de **redes simétricas**. Las corrientes totales que atraviesan las ramas que unen ambas semi-redes son nulas. El comportamiento del circuito no se altera si se abren dichas ramas.



Red simétrica con entrada diferencial, los nodos que unen ambas semi-redes están a cero voltios por ser nula la corriente que atraviesan las impedancias que los unen a masa. El comportamiento del circuito no se altera si se abren dichas ramas y se unen nodos comunes a masa.



Circuito Cascodo



Permite trabajar con **mayores tensiones de salida**. Buen comportamiento en **alta frecuencia**. Se utiliza como etapa de entrada, no intermedia.

Etapas CMOS

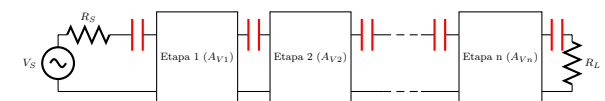
2.- Amplificadores Multietapa

Clasificación

De alterna o de acoplo RC: Se agrupan en cascada de amplificadores monoetapa conectándose mediante condensadores de acoplo. **De continua o de acoplo directo** No existen condensadores de paso y amplifican tensiones continuas.

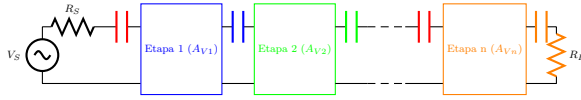
Análisis en Continua

Amplificadores RC: Cada etapa puede analizarse independientemente. No existe dependencia entre los puntos de trabajo de las distintas etapas.



Amplificadores de continua: Todas las etapas están interrelacionadas, es aconsejable seguir un orden para su análisis.

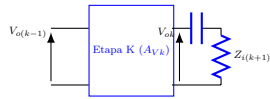
Ganancia en Pequeña Señal



La **ganancia total** es el producto de las ganancias de cada etapa:

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_{o(n-1)}} \cdot \dots \cdot \frac{v_{o2}}{v_{o1}}$$

Ganancia de una etapa:



Es preciso tener en cuenta la impedancia de la siguiente etapa.

$$A_{vk} = \frac{v_{ok}}{v_{o(k-1)}} |Z_{i(k+1)}|$$

Margen dinámico a la Salida

Máxima señal obtenible en la carga sin distorsión, se mide en V_P o en V_{PP} . Viene determinado por las situaciones de corte/saturación de los transistores.

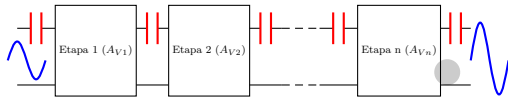
Margen dinámico debido a una etapa: Si la etapa k -ésima tiene un margen dinámico a su salida permitirá a la salida del amplificador un margen dinámico.

$$M_{dko} = M_{dk} \cdot |A_{v(k+1)}| \cdot |A_{v(k+2)}| \cdot \dots \cdot |A_{vn}|$$

Margen dinámico del amplificador: Menor de los márgenes dinámicos debidos a cada etapa.

$$M_{do} = \min\{M_{d1o}, M_{d12}, \dots, M_{dn}\}$$

Margen dinámico a la Entrada



Máximo nivel de señal en la entrada para no tener distorsión a la salida.

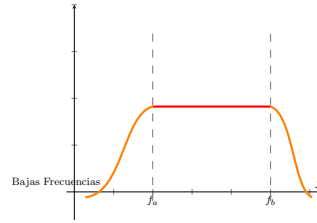
$$M_{di} = \frac{M_{do}}{|A_v|}$$

3. Respuesta en Frecuencia

Amplificadores Reales

Las señales son amplificadas de forma distinta según sea su frecuencia.

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \rightarrow \text{frecuencia} \rightarrow A_v(f) = \frac{V_o(f)}{V_i(f)}$$



Debido a los efectos de las capacidades, de paso y parásitas, $|A(f)| \downarrow$.

Diagramas de Bode

$$|A(f)|(dB) \rightarrow 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{A(f)}{A_o} \right|$$

Expresión de la Ganancia

La **ganancia de un amplificador** para la región útil y zonas no muy alejadas de ella se expresa en función de s :

$$A(s) = A_o \frac{s}{s + w_b} \frac{w_a}{s + w_a}$$

Si el amplificador está bien diseñado, $w_a \gg w_b$. w_a y w_b son siempre números reales (circuitos RC no realimentados).

Comportamiento Asintótico

Frecuencias de Corte

Son aquellas frecuencias en las que la ganancia se reduce $\sqrt{2}$ veces $\rightarrow 20 \log(1/\sqrt{2}) = -3dB$

Respuesta en Bajas Frecuencias

Terminar

4. Fuentes de Corriente y Cargas Activas

Una **carga activa** o **carga dinámica** es un componente de circuito que se comporta como una resistencia no lineal estable contra corriente. Utilizado frecuentemente en la entrada de amplificadores operacionales para incrementar considerablemente la ganancia.

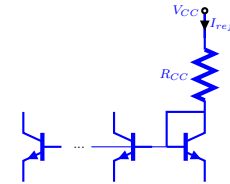
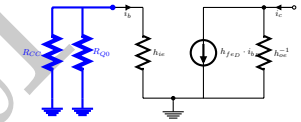
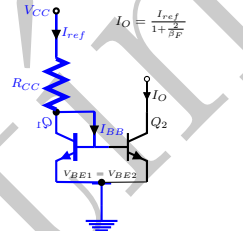
Introducción y Figura de Mérito

La **figura de mérito** de un amplificador es el producto de la ganancia por el ancho de banda.

$$GB = |A_M|BW$$

Configuraciones de Fuentes de Corriente

Espejo de Corriente: Permite obtener una corriente constante (fuente de corriente).

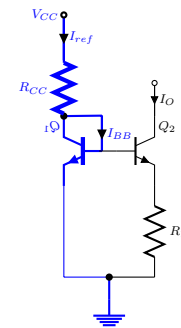


Si hay varias etapas se divide la corriente:

$$I_O = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{N}{\beta_F}}$$

Fuente Widlar

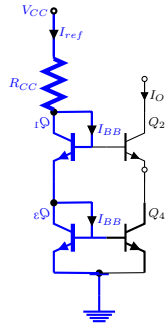
Variación del circuito anterior con una resistencia en el emisor del transistor de salida para obtener corrientes pequeñas constantes en la salida.



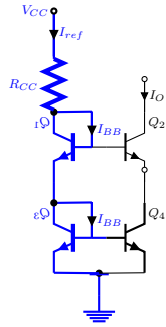
$$I_0^{(k+1)} = \frac{V_T}{R_E} \ln \left(\frac{I_{ref}}{I_0^{(k)}} \right)$$

Fuente de Cascodo

Proporciona impedancia de salida alta, mucho mayor que en las otras fuentes.



Fuente de Wilson



Permite obtener alta ganancia de corriente e impedancia de salida elevada.

Cargas Activas

FC y CA con Amplificadores Diferenciales

Polarización Independiente de V_{CC}

Desplazador de Nivel

5. Etapas de Potencia

Clasificación

Clase A: El transistor conduce durante el **ciclo completo**.

Clase B: El transistor conduce durante **medio ciclo**.

Clase AB: El transistor conduce durante algo **más de medio ciclo**.

Clase C: El transistor conduce durante algo **menos de medio ciclo**.

Definiciones

Potencia Consumida: Potencia suministrada por la fuente de alimentación de continua.

$$P_{CC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt = V_{CC} \cdot \langle i_C(t) \rangle$$

Potencia Entregada a la Carga: Potencia de la señal amplificada en la carga de alterna.

$$P_O = V_{oeff} \cdot I_{oeff} = V_{Leff} \cdot I_{Leff} = P_L$$

Potencia disipada por el transistor: Consumida en el transistor, lo calienta.

$$P_D = P_{CC} - P_O - P_{resto}$$

Rendimiento de la etapa: Potencia entregada a la carga, respecto de la consumida de la fuente de alimentación.

$$\eta(\%) = \frac{P_O}{P_{CC}} \cdot 100\%$$

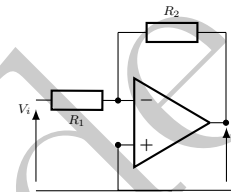
Amplificadores Clase A

Amplificadores Clase B y Clase AB

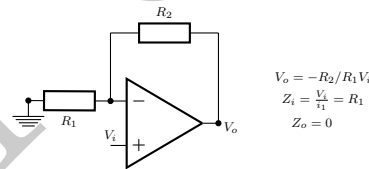
Consideraciones Térmicas

6. Amplificador Operacional

- Impedancia de entrada infinita
- Impedancia de salida nula
- Ganancia diferencial infinita
- CMRR infinito
- Margen dinámico $\pm V_{CC}$

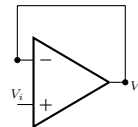


Amplificador Inversor:



$$\begin{aligned} V_o &= -R_2/R_1 V_i \\ Z_i &= \frac{V_i}{I_i} = R_1 \\ Z_o &= 0 \end{aligned}$$

Amplificador No Inversor:



$$\begin{aligned} V_o &= V_i (1 + R_2/R_1) \\ Z_i &= \frac{V_i}{I_i} = R_1 \\ Z_o &= 0 \end{aligned}$$

Seguidor:

$$\begin{aligned} V_o &= V_i \\ Z_i &= \frac{V_i}{I_i} = \infty \\ Z_o &= 0 \end{aligned}$$

7. Realimentación