

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

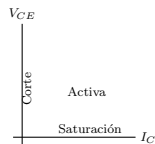
h_{rx} : Reverse voltage ratio

h_{fx} : Forward current transfer ratio

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

Base Común	Emisor Común	Colector Común
$h_{ib} = \frac{v_{eb}}{i_e} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{ie} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{ic} = \frac{v_{bc}}{i_b} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$
$h_{rb} = \frac{v_{eb}}{i_e} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{re} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$	$h_{rc} = \frac{v_{bc}}{i_b} = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{V_T \beta}{I_C}$
$h_{fb} = \frac{i_c}{i_e} = \frac{i_b}{i_b} = 1$	$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b} = \beta$	$h_{fc} = \frac{i_e}{i_b} = \beta + 1$
$h_{ob} = \frac{i_e}{v_{eb}} = \frac{i_b}{v_{be}} = \frac{1}{V_T \beta}$	$h_{oe} = \frac{i_c}{v_{ce}} = \frac{i_b}{v_{be}} = \frac{1}{V_T \beta}$	$h_{oc} = \frac{i_e}{v_{ec}} = \frac{i_b}{v_{be}} = \frac{1}{V_T \beta}$

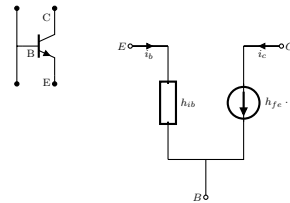
Regiones Operativas



- **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 $I_B = 0$.

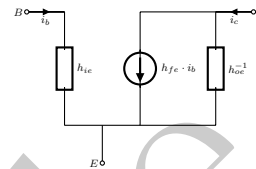
Configuraciones de Montaje

Base Común



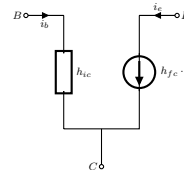
- Baja impedancia de entrada.
- Alta impedancia de salida
- Ganancia unidad, o menor, de corriente.
- Ganancia alta de tensión.

Emisor Común



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

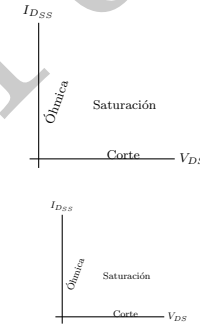
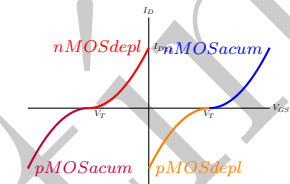
Colector Común



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

Transistor FET

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



Equivalencias



Resolución de Ejercicios con Transistores

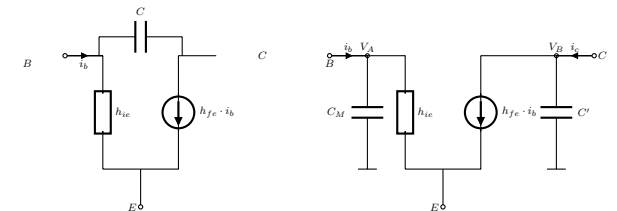
Puntos de Polarización

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

Pequeña Señal

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

Condensador entre dos patas de un BJT.



$$\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = (\text{Componentes en paralelo con el C})$$

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

Impedancias de Entrada y Salida

Factor de Rechazo al Modo Común

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

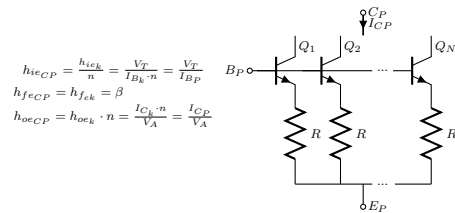
Para mejorar CMRR \rightarrow disminuir la ganancia en el modo común \rightarrow incrementar R_E . Sustituir las resistencias por cargas activas (fuentes de corriente que en alterna se comportan como resistencias).

Resolución de Ejercicios con Operacionales

- Identificar redes de realimentación \rightarrow cuando haya un camino que une la salida de una etapa con la entrada.

1. Etapas de Dos Transistores

Configuración en Paralelo

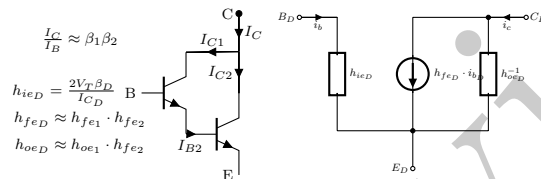


Se comporta como un **único transistor**, necesita una resistencia R (*ballast resistor*) para estabilizar el reparto de corriente entre los transistores. Permite trabajar en **altas corrientes**.

Las resistencias de emisor permiten estabilizar el circuito tensión.

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

Configuración Darlington

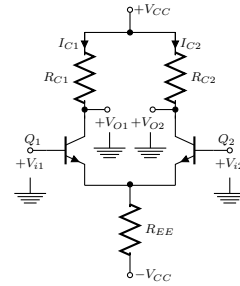


$$h_{ieD} = h_{ie1} (1 + h_{fe1}) \cdot h_{ie2}$$

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:

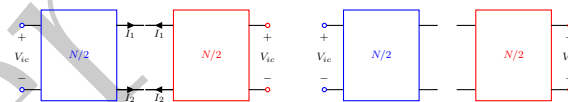
- Salida Diferencial:** La señal de salida se toma entre las salidas de cada semi-red ($V_O = V_{O1} - V_{O2}$).
- Salida Asimétrica:** La señal de salida se toma de la salida de una semi-red ($V_O = V_{Ox}$). Para este modo es necesaria una R_{EE} elevada.

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

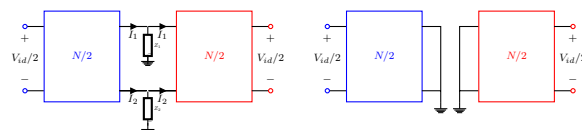
Mirar página 23— salida simétrica y tal

Teorema de Bartlett

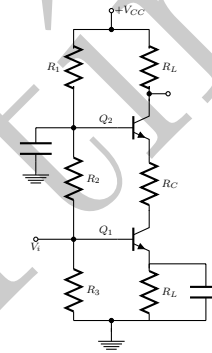
Simplifica el análisis de **redes simétricas**. Las corrientes totales que atraviesan las ramas que unen ambas semi-redes son nulas. El comportamiento del circuito no se altera si se abren dichas ramas.



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 Cascado



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

Etapas CMOS

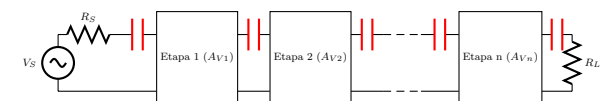
2.- Amplificadores Multietapa

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.

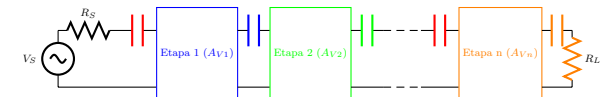
Análisis en Continua

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 inter-relacionadas, es aconsejable seguir un orden para su análisis.

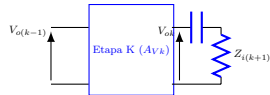
Ganancia en Pequeña Señal



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

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

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.

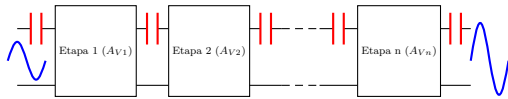
Margen dinámico debido a una etapa: Si la etapa k-ésima tiene un margen dinámico a su salida permitirá a la salida del amplificador un margen dinámico.

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

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

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

Margen dinámico a la Entrada



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

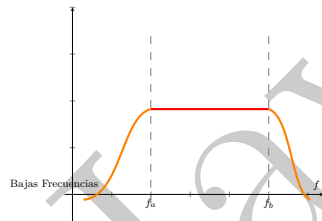
$$M_{di} = \frac{M_{do}}{|A_v|}$$

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.

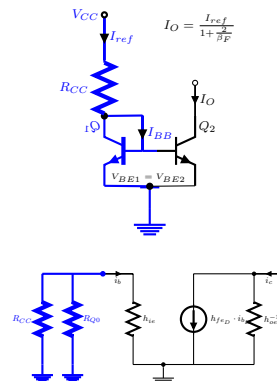
Introducción y Figura de Mérito

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).

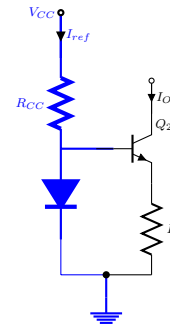
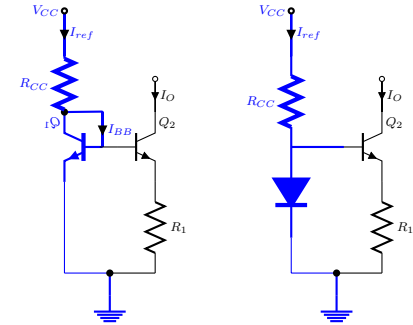


Si hay varias etapas se divide la corriente:

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

Fuente Widlar

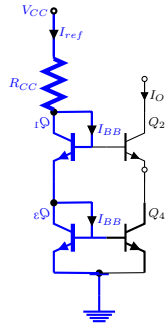
Variación del circuito anterior con una resistencia en el emisor del transistor de salida para obtener corrientes pequeñas constantes en la salida.



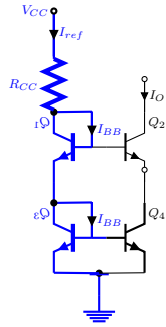
$$I_0^{(k+1)} = \frac{V_T}{R_E} \ln \left(\frac{I_{ref}}{I_0^{(k)}} \right)$$

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.

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

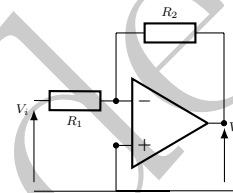
Amplificadores Clase A

Amplificadores Clase B y Clase AB

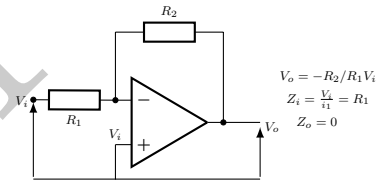
Consideraciones Térmicas

6. Amplificador Operacional

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



Amplificador Inversor:

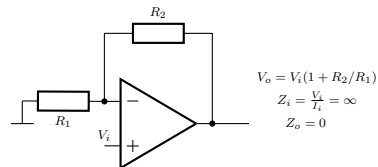


$$V_o = -R_2/R_1 V_i$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_1$$

$$Z_o = 0$$

Amplificador No Inversor:

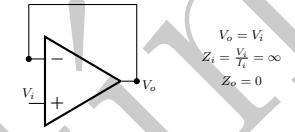


$$V_o = V_i (1 + R_2/R_1)$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \infty$$

$$Z_o = 0$$

Seguidor:



$$V_o = V_i$$

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \infty$$

$$Z_o = 0$$

Efectos no ideales



Corrientes de Polarización

7. Realimentación