

Electrónica Analógica 1

Amplificador diferencial

La entrada de un Amplificador Operacional está constituida por un Amplificador Diferencial (AD). Abordaremos el análisis del Amplificador o Par diferencial con transistores bipolares.

La Figura 1 muestra un esquema de un AD para el cual, idealmente, la salida es proporcional a la diferencia entre las señales de entrada.

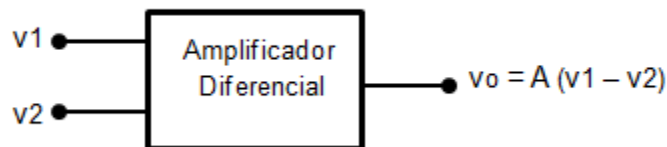


Figura 1

Se define la tensión de entrada en modo diferencial como:

$$v_d = v_1 - v_2$$

Se define la tensión de entrada en modo común como:

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

La Figura 2 muestra el circuito básico de un par diferencial con transistor bipolar.

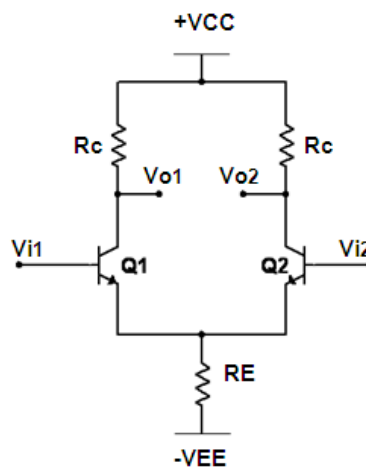


Figura 2

Los transistores Q1 y Q2 se suponen idénticos. Los emisores están conectados juntos a un resistor R_E y se polariza a través de ésta conectada a $-V_{EE}$. Los colectores de Q1 y Q2 se conectan a resistores R_C iguales a la tensión $+V_{CC}$. Al variar las tensiones de entrada se produce una salida en ambos colectores.

Si se aplican las mismas señales (operación en modo común) en las entradas se producirán señales en cada colector (idealmente iguales), de modo que la diferencia entre las mismas produce una resultante nula. En la práctica, los transistores no son exactamente iguales lo mismo que los resistores de colector de modo que la resultante es pequeña pero no nula.

Cuando se aplican a las entradas señales opuestas (operación en modo diferencial) la tensión de salida es grande y se obtiene una ganancia grande. La relación entre las ganancias en modo diferencial respecto a la ganancia en modo común se denomina Relación de Rechazo de Modo Común (RRMC). Un buen amplificador diferencial tiene un RRMC muy grande.

Analicemos el caso de aplicar una señal de modo común v_c en las bases de los transistores Q1 y Q2 como se muestra en la Figura 3. La tensión de emisor será: $v_E = V_c - V_{BE}$.

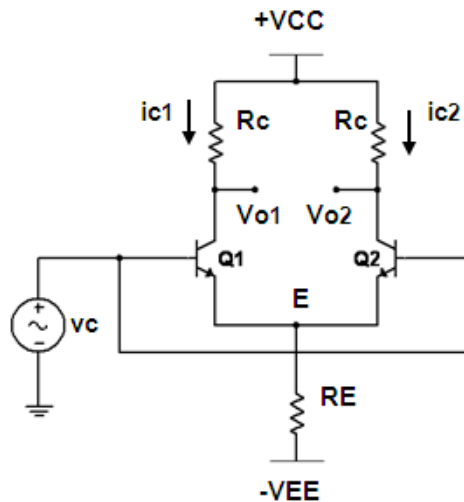


Figura 3

Como suponemos que $Q1 = Q2$ las corrientes de emisor serán iguales y las corrientes de colector aproximadamente iguales a las corrientes de emisor.

$$i_{E1} = i_{E2} \cong i_{c1} \cong i_{c2}$$

$$v_{o1} = V_{CC} - i_{c1} R_c, \quad v_{o2} = V_{CC} - i_{c2} R_c$$

$$v_{o2} - v_{o1} = 0$$

Si se aplican tensiones de igual valor pero de signo contrario a las bases de Q1 y Q2 (modo diferencial) como en la Figura 4, la tensión en la base de Q1 aumenta $v_{B1} = v_d/2$ y la tensión en la base de Q2 disminuye $v_{B2} = -v_d/2$, resultando que las tensiones totales en las bases de los transistores ya no serán iguales. Dado que los emisores son comunes a los dos transistores, v_{B1} aumenta y v_{B2} disminuye resultando una diferencia en las corrientes de base y por lo tanto de colector (suponemos igual β para los transistores).

$$i_{B1} > i_{B2} \text{ resultando } i_{c1} > i_{c2}$$

Si llamamos IC_Q al valor de i_c con $v_d = 0$ y teniendo en cuenta el razonamiento anterior:

$$i_{c1} = IC_Q + \Delta i_c, \quad i_{c2} = IC_Q - \Delta i_c$$

$$v_{o1} = V_{CC} - i_{c1} R_c = V_{CC} - (IC_Q + \Delta i_c) R_c$$

$$v_{o2} = V_{CC} - i_{c2} R_c = V_{CC} - (IC_Q - \Delta i_c) R_c$$

$$v_{o2} - v_{o1} = 2 \Delta i_c R_c$$

Aparece una diferencia de tensión entre los colectores de Q1 y Q2 cuando se aplica la señal en modo diferencial.

Análisis del amplificador en pequeña señal

La Figura 4 muestra el circuito básico para realizar un análisis en pequeña señal.

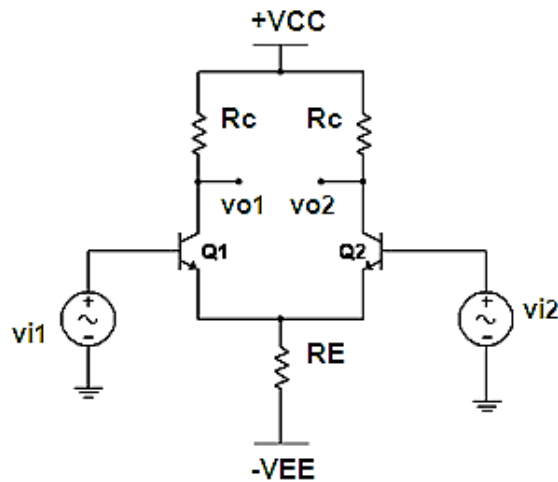


Figura 4

La Figura 5 muestra el circuito equivalente de pequeña señal utilizando el modelo simplificado de parámetros h en emisor común.

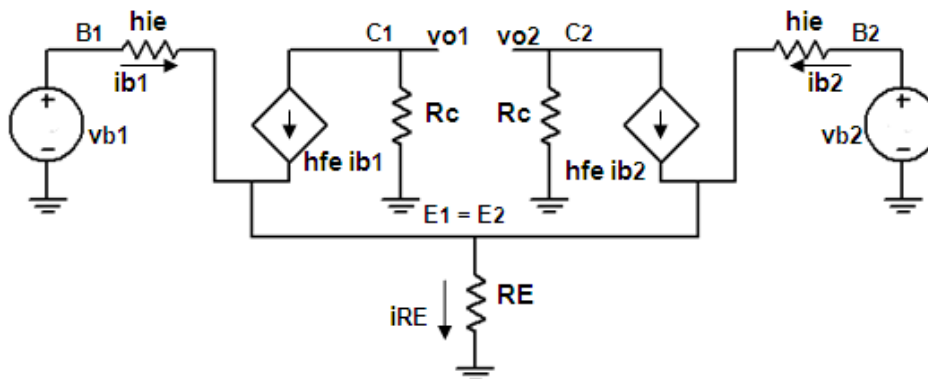


Figura 5

$$i_{RE} = i_{b1} (1 + h_{fe}) + i_{b2} (1 + h_{fe}) = \frac{v_E}{R_E}$$

$$i_{b1} = \frac{v_{b1} - v_E}{h_{ie}} \quad i_{b2} = \frac{v_{b2} - v_E}{h_{ie}}$$

Reemplazando en la ecuación anterior y operando:

$$v_E = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2 + \frac{h_{ie}}{R_E(1+h_{fe})}}$$

Si consideramos la salida por C2 denominada en el circuito equivalente v_{o2} se tiene:

$$v_{o2} = v_{c2} = -h_{fe} i_{b2} R_c = -h_{fe} R_c \frac{(v_{b2} - v_E)}{h_{ie}}$$

Reemplazando el valor de v_E y operando se obtiene:

$$v_{o2} = -\frac{h_{fe} R_c}{h_{ie}} \frac{\left(v_{b2} \left(1 + \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})R_E} \right) - v_{b1} \right)}{2 + \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})R_E}}$$

Como interesa el mayor valor de v_{o2} , el mejor caso se obtiene cuando R_E es muy grande, teóricamente infinito. En esas condiciones:

$$v_{o2} = -\frac{h_{fe} R_c}{h_{ie}} \frac{(v_{b2} - v_{b1})}{2}$$

La entrada en modo diferencial es $v_d = v_{b1} - v_{b2}$. Si definimos la ganancia diferencial respecto de v_{o2} por: $A_d = v_{o2}/v_d$ resulta:

$$A_d = \frac{v_{o2}}{v_d} = \frac{h_{fe} R_c}{2 h_{ie}}$$

Si ahora consideramos el modo diferencial (v_d) y el modo común (v_c) y escribimos v_{b1} y v_{b2} en función de las tensiones anteriores:

$$v_d = v_{b1} - v_{b2} \quad v_c = \frac{v_{b1} + v_{b2}}{2}$$

Resultan:

$$v_{b1} = v_c + \frac{v_d}{2} \quad v_{b2} = v_c - \frac{v_d}{2}$$

Reemplazando en la ecuación anterior de v_{o2} , y luego operando:

$$v_{o2} = -\frac{h_{fe} R_c}{h_{ie}} \frac{\left[\left(v_c - \frac{v_d}{2} \right) \left(1 + \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})R_E} \right) - \left(v_c + \frac{v_d}{2} \right) \right]}{2 + \frac{h_{ie}}{(1+h_{fe})R_E}}$$

$$v_{o2} = \frac{h_{fe} R_c}{2 h_{ie}} v_d - \frac{h_{fe} R_c}{h_{ie}} \frac{1}{1 + 2 \frac{(1+h_{fe})R_E}{h_{ie}}} v_c$$

La ecuación anterior puede escribirse en la forma:

$$v_{o2} = A_d v_d + A_c v_c$$

De la ecuación anterior resulta una ganancia A_c en modo común:

$$A_c = - \frac{hfe R_c}{hie} \frac{1}{1 + 2 \frac{(1+hfe)R_E}{hie}}$$

Analizando la expresión anterior se ve que convendría que $R_E \rightarrow \infty$ de modo que $A_c \rightarrow 0$. Esto se logra alimentando a los transistores en el emisor con una fuente de corriente ideal que tiene una resistencia en paralelo R_o infinita. En la práctica la resistencia R_o no es infinita pero si muy grande con los que se logra disminuir la ganancia en modo común. En la Figura 6 se muestra el circuito en forma esquemática.

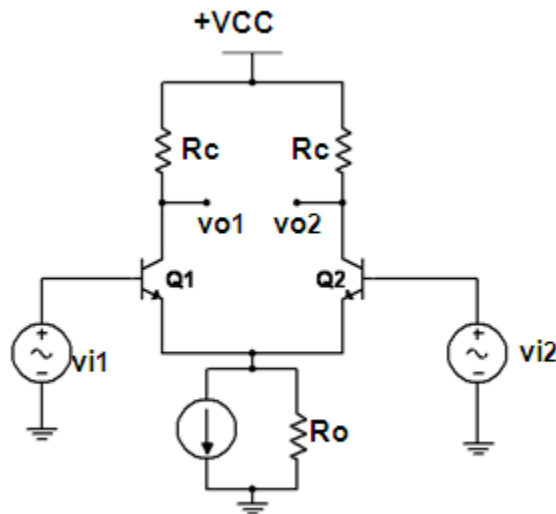


Figura 6

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de par diferencial bipolar con fuente de corriente.

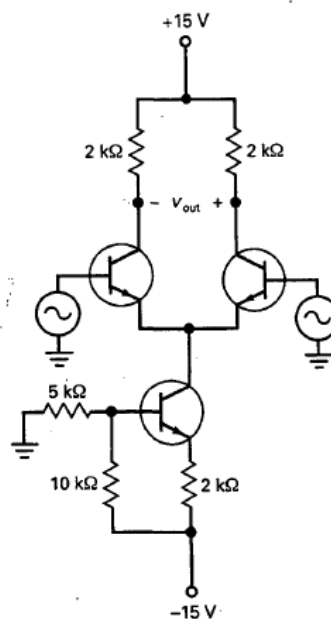


Figura 7