

PRACTICA 3

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

El amplificador diferencial es un circuito versátil que sirve como etapa de entrada para la mayoría de los amplificadores operacionales y también encuentra su aplicación en circuitos integrados como el comparador y la puerta lógica acoplada por emisor.

En la figura 3.1 esta representada la configuración básica. El esquema indica que el circuito tiene dos entradas v_1 y v_2 y tres salidas v_{o1} , v_{o2} y $v_{o1}-v_{o2}$. La importancia del amplificador diferencial estriba en el hecho de que las salidas son proporcionales a la diferencia entre las dos señales de entrada, como vamos a ver. Así pues, el circuito se puede utilizar para amplificar la diferencia entre las dos entradas o amplificar una sola entrada conectando simplemente a masa la otra. Las características que distinguen las diversas salidas serán estudiadas en la exposición que sigue.

El amplificador diferencial que vamos a analizar en esta sección se supone que está fabricado en una pastilla de circuito integrado. Cuando éste es el caso, podemos suponer que los transistores T1 y T2 son idénticos y, por tanto, que existe una simetría entre ambas mitades del circuito.

SEÑALES EN LAS CONFIGURACIONES DE MODO COMUN Y DIFERENCIAL

Como el amplificador diferencial se utiliza más comúnmente para amplificar la diferencia entre las dos señales de entrada, es adecuado expresar las entradas como sigue, de manera que resalte este hecho. Llamemos V_d a la diferencia entre las tensiones de entrada, por lo que

$$V_d = V_2 - V_1$$

Esta es la tensión de entrada de modo diferencial. Para completar necesitaremos un término que designe el valor medio de las tensiones de entrada, que llamaremos V_a . Resulta cómodo definir esta tensión por

$$V_a = \frac{V_2 + V_1}{2}$$

2

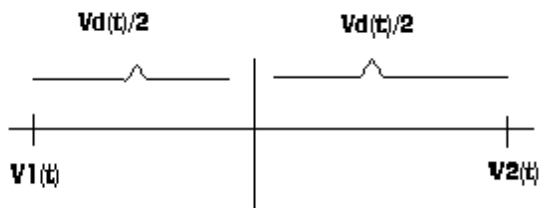
Puesto que V_a es el promedio de las dos tensiones de entrada, se le denomina tensión de entrada de modo común.

Poniendo V_1 y V_2 en función de V_a y V_d hallamos que

$$V_2 = V_a + V_d/2$$

$$V_1 = V_a - V_d/2$$

Por estas expresiones vemos que las tensiones de entrada pueden ser expresadas en función de una tensión de entrada de modo común y una tensión de entrada de modo diferencial.



En las aplicaciones usuales del amplificador diferencial, la entrada de modo diferencial es la señal deseada que se amplifica mientras la entrada de modo común debe ser suprimida o rechazada y por tanto no amplificada. Las definiciones anteriores nos permiten analizar directamente el circuito en función de estas entradas de modo común y de modo diferencial y concentrarnos en los parámetros importantes del amplificador diferencial. Para fines de ensayo podemos calcular fácilmente señales de entrada que son totalmente de modo común o totalmente de modo diferencial. Por ejemplo si $V_1 = -V_2$, $V_d = 2V_2 = -2V_1$. Por otra parte si $V_1 = V_2$ la entrada de modo diferencial es cero y la entrada de modo común $V_a = V_1 = V_2$

ANÁLISIS DEL PUNTO Q

Cuando estudiábamos los amplificadores de una sola etapa vimos que la recta de carga (de c.a. o c.c.) definía completamente la curva de funcionamiento del circuito de colector dentro de los límites de variación de la señal de entrada. Esta curva se mantiene como línea recta cuando el circuito contiene solamente 2 resistencias y fuentes de tensión. Ahora estamos en una situación diferente; tenemos dos señales de entrada. Cada transistor funcionará dentro de una región de las características del colector a la que corresponden valores máximo y mínimo de las dos señales de entrada. En esta sección determinaremos las fronteras de la región de funcionamiento, esto nos conducirá a expresiones que se puede utilizar para asegurar que estas fronteras proporcionan un funcionamiento lineal en el margen previsible de variación de las señales de entrada. El análisis se realiza mejor en función de las entradas de modo diferencial y de modo común definidas ya anteriormente.

Usualmente cuando deseamos determinar el punto Q de un amplificador diferencial ajustamos a cero la señal de entrada. Para el amplificador diferencial es apropiado partir del análisis del punto Q suponiendo que la entrada de modo diferencial es cero. Esto se consigue haciendo simplemente que las dos entradas sean iguales entonces tenemos que $V_a = V_1 = V_2$. Con este supuesto comenzamos observando que gracias a la simetría del circuito, podemos separar los emisores intercalando una resistencia de $2R_e$ en cada rama de emisor como en la figura 3.3. Aplicando la segunda Ley de Kirchhoff al circuito original de la figura podemos ver que la tensión de emisor no ha cambiado. En efecto

$$V_{E1} = V_{E2} = (i_{E1} + i_{E2})R_e - V_{EE}$$

Cuando $V_1 = V_2$, tendremos nuevamente, gracias a la simetría $i_{E1} = i_{E2} = i_E$, por lo que

$$V_{E1} = V_{E2} = i_E(2R_e) - V_{EE}$$

Esta tensión es justamente la misma que la tensión de emisor hallada en el circuito separado de la figura 3.3.

La ecuación de la recta de carga, que es válida cuando $V_a = V_1 = V_2$ se halla aplicando la ley de Kirchhoff de tensiones en el bucle colector-emisor

$$V_{CE} = V_{CC} - i_C R_C - i_E(2R_e) + V_{EE} = V_{CC} + V_{EE} - i_C(R_C + 2R_e)$$

La corriente de emisor se halla aplicando la ley de Kirchhoff de tensiones al bucle base-emisor.

$$V_a = I_B R_b + V_{BE} + i_E (2R_E) - V_{EE}$$

$$\text{Como } I_B = I_C / (h_{fe} + 1)$$

$$i_c = \frac{V_a + V_{EE} - 0.7}{2R_E + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2R_E + R_b / (h_{fe} + 1)$$

En la obtención de esta fórmula hemos despreciado el efecto de h_{ie} y considerado que V_{BE} es constante. En este caso, la aproximación es excelente, puesto que la impedancia h_{ie} reflejada en el emisor en la figura 3.3 es $h_{ie}(h_{fe} + 1)$. Esta impedancia está en serie con $2R_E$ que es una resistencia mucho mayor en la práctica.

La ecuación de la recta de carga esta representada en la figura. Cómo sólo está presente la entrada d modo común, la llamaremos recta de carga de modo común. Aquí, Q es el punto estático o de reposo obtenido ajustando a cero la entrada de modo común V_a . Los puntos marcados Q_{max} y Q_{min} representan los puntos de trabajo obtenidos cuando la entrada de modo común V_a varía desde su valor más positivo $V_{a,max}$ hasta su valor más negativo $V_{a,min}$ con la entrada de modo dife-

rencial igual a cero. Hay que señalar que se aplica la misma recta de carga a cada transistor, puesto que la corriente de colector de cada uno es la misma en tanto que las tensiones de entrada serán idénticas y la tensión de salida $v_{o1} - v_{o2}$ entre los colectores, será cero independientemente del valor de V_d en tanto que $V_1 = V_2$. Las tensiones individuales de colector v_{o1} y v_{o2} variarán, sin embargo, con las variaciones de V_a . Seguidamente determinaremos la extensión de esta variaciones.

Lo que acabamos de exponer determina la región de funcionamiento cuando la entrada de modo diferencial es cero. Debemos determinar el efecto de una entrada no nula de modo diferencial. Por tanto, sea $v_2 = -v_1 = V_d/2$. En este caso la entrada de modo común es nula y el punto estático o de reposo es el punto Q representado en la figura 3.4. Volviendo al circuito de la figura 3.1 y poniendo $V_2 = V_d/2$ y $V_1 = -V_d/2$, vemos que, cuando v_2 aumenta, también aumenta la corriente de emisor i_{E2} y cuando v_1 disminuye, también disminuye la corriente i_{E1} . Si las variaciones de v_1 y v_2 no son excesivas, el aumento de i_{E2} es igual a la disminución de i_{E1} y, por tanto no habrá variación de la corriente $i_{E1} + i_{E2}$ que circula por R_E . Así pues, la tensión de emisor $V_{E1} = V_{E2}$ se mantiene fija cuando se aplica la señal de modo diferencial. Pero puesto que i_{E1} e i_{E2} están variando V_{CE1} y V_{CE2} deben variar también de modo que las variaciones de V_{CE} son proporcionales a las variaciones de la corriente por la resistencia de colector.

O sea, utilizando la notación para pequeña señal

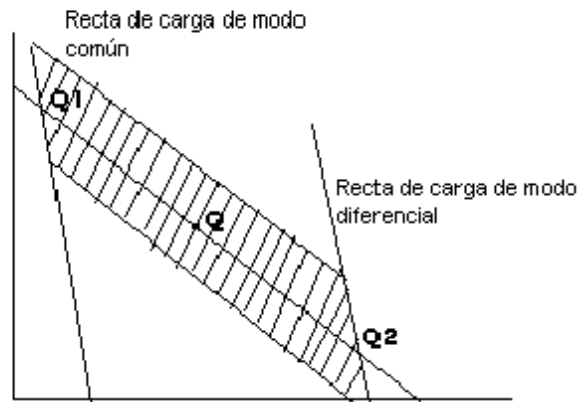
$$V_{ce1} = -R_{ci1} i_{c1}$$

$$V_{ce2} = -R_{ci2} i_{c2}$$

Las ecuaciones son las correspondientes a la recta de carga de modo diferencial del amplificador diferencial y la pendiente de estas rectas de carga es $-1/R_c$.

La combinación de las rectas de carga de modo diferencial y de modo común define la región de funcionamiento de cada transistor. Como cada señal de entrada tendrá, en general presente ambas componentes, podemos establecer los confines de la región de funcionamiento si conocemos los valores

máximo y mínimo de las señales o de sus



componentes de modo diferencial y de modo común, respectivamente.

ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL. Ahora que hemos determinado las condiciones necesarias para que el funcionamiento sea lineal concentremos nuestra atención en el funcionamiento en pequeña señal del amplificador diferencial. A este fin dibujemos el circuito equivalente de pequeña señal en que todos los componentes están reflejados en el emisor. Este circuito equivalente lo vemos en la figura 3.5.

En la figura 3.5.a si hemos ajustado $V_d=0$, se ve fácilmente que como consecuencia la simetría $i_{e1}=i_{e2}$. Haremos uso de esto para determinar i_{e1} e i_{e2} utilizando el principio de superposición. Para ello primero ajustaremos $V_d=0$ y determinaremos la corriente media de emisor, o de modo común, $i_{e1}=i_{e2}=i_a$. Ajustaremos $V_a=0$ y determinaremos la corriente media de emisor de modo diferencial $i_{e2}=-i_{e1}=i_d$.

En la figura 3.6.a está representada el circuito de la figura 3.5.a cuando $V_d=0$. Puesto que la corriente que circula en R_e es $2i_a$ la tensión de emisor $V_e=2R_e i_a$. Lo mismo que antes, a causa de la simetría, podemos separar R_e en dos resistencias en paralelo (cada uno igual a $2R_e$) y partir el circuito en dos mitades para obtener el circuito equivalente reducido de la figura 3.6.b. Se ve que la tensión de emisor V_e es exactamente la misma en este circuito reducido que en el circuito de la figura 3.6.a. Utilizando la fig. 3.6.b hallamos la corriente de modo común.

$$i_a = \frac{V_a}{2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

La figura 3.6.c es el circuito equivalente de la figura 3.5.a cuando $V_a=0$. A causa de las polaridades de las dos fuentes, $V_e=0$. Por lo tanto este circuito puede ser reducido al presentado en la figura 3.6.d. La corriente i_d es

$$i_d = \frac{V_d/2}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

Aplicando el teorema de superposición

$$i_{e1} = \frac{V_a}{2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)} - \frac{V_d/2}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1) \quad h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

$$i_{e2} = \frac{V_a}{2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)} + \frac{V_d/2}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1) \quad h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

Utilizando el circuito equivalente de salida representado en la figura 3.5.b y suponiendo $i_c = i_e$ podemos determinar fácilmente $V_{o1}, V_{o2}, V_{o1} - V_{o2}$:

$$V_{o1} = -R_{c1} i_c = -\frac{R_c}{2} V_d - \frac{R_c}{h_{fe} + 1} V_a$$

$$h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1) \quad 2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

$$v_{o2} = -R_{c2} i_c = -\frac{R_c}{2} V_d - \frac{R_c}{h_{fe} + 1} V_a$$

$$h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1) \quad 2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

RELACION DE RECHAZO AL MODO COMUN

Podemos escribir las tensiones de salida v_{o1} y v_{o2} como sigue

$$V_{o1} = A_d V_d - A_a V_a$$

$$V_{o2} = -A_d V_d - A_a V_a$$

Donde A_d ganancia de modo diferencial, es

$$A_d = \frac{R_c}{2} \frac{h_{fe}}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

y A_a , ganancia de modo común, es

$$A_a = \frac{R_c}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)$$

En un amplificador diferencial ideal la tensión de salida es proporcional a V_d y no depende de la tensión de modo común V_a . Según esto, en un amplificador diferencial ideal $A_a = 0$, R_e tendría que ser infinita. Con el fin de medir la desviación con respecto al ideal, se utiliza una cantidad denominada relación de rechazo al modo común (CMRR). Se define como la relación entre la ganancia de modo diferencial y la ganancia de modo común.

$$CMRR = A_d / A_a$$

Cuando se utilizan las ecuaciones arriba mostradas

$$CMRR = \frac{2R_e + h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}{h_{ib} + R_b / (h_{fe} + 1)}$$

$$2(h_{ib} + R_b / h_{fe})$$

Así como ocurre realmente en la práctica, $2R_e$ mucho mayor que $h_{ib} + R_b / h_{fe}$, entonces

$$CMRR = \frac{R_e}{h_{ib} + R_b / h_{fe}}$$

$$h_{ib} + R_b / h_{fe}$$

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE

Para hallar el valor máximo de la CMRR consideremos que puesto que $h_{ib} = V_T / I_{CQ}$

se puede escribir en la forma siguiente

$$CMRR = \frac{R_e}{V_T / I_{CQ} + R_b / h_{fe}}$$

Si R_b / h_{fe} es pequeña tendremos

$$CMRR = \frac{R_e I_{CQ}}{V_T}$$

Por lo tanto sólo se puede aumentar el CMRR si aumentamos $R_e I_{CQ}$ que es la caída de tensión en R_e . Por supuesto que este proceso resulta limitado por la disipación de potencia en R_e , la tensión disponible de la fuente de alimentación.

Los amplificadores diferenciales utilizados en la práctica suelen tener una fuente de corriente constante en lugar de R_e como mostramos en la figura siguiente:

En este circuito el transistor T3 actúa como una fuente de corriente constante que proporciona corriente estática necesaria y una impedancia muy alta vista desde el colector. Esta es la impedancia que sustituye a R_e .

FUNCIONAMIENTO EN REPOSO

La corriente de reposo sin señal, llamada también estática I_{CQ3} suministrada por T3 es

$$I_{CQ3} = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_e}$$

I_{CQ3} es constante mientras T3 no esté saturado.

RECTA DE CARGA DE MODO COMUN

La recta de carga de modo común describe la variación de la corriente de colector i_{C1} en función de V_{CE1} cuando $v_1 = v_2 = v_a$ teniendo en cuenta la simetría del circuito

$$i_{C1} = i_{C2} = \frac{1}{2} i_{C3}$$

De aquí se deduce que la recta de carga para modo común para T1 y T2 es una línea horizontal.

La extensión de la recta de carga que es la variación de V_{CE1} en función de la entrada $v_1 = v_2 = v_a$ puede obtenerse mediante la ley de Kirchhoff de tensiones

$$V_{C1} = V_{CC} - R_{C1} I_{CQ1} \text{ y } V_{E1} = V_a - R_{B1} I_{BQ1} - 0.7$$

Entonces

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = V_{CC} - R_{C1}I_{C1} - V_a + 0.7 + R_{B1}I_{C1}/h_{fe}$$

De forma similar, se puede ver que

$$V_{CE2} = V_{CC} - R_{C2}I_{C2} - V_a + 0.7 + R_{B2}I_{C2}/h_{fe}$$

De este modo se ve que V_{CE1} y V_{CE2} varía directamente con la señal de V_a .

La variación positiva de la tensión de modo común debe ser restringida para que V_{CE1} sea mayor de 0.3 volts y la variación negativa no debe causara la saturación de T3, es decir V_{CE3} debe ser mayor de 0.3 volts .

RECTA DE CARGA DE MODO DIFERENCIAL

Cuando consideramos la entrada de modo común $v_a = v_1 = v_2$ una variación de v_a produ-

cía una variación proporcional en V_{CE3} . En el modo diferen-cial V_{CE3} es constante. Esto es, cuando V_d se incrementa la corriente de base i_{B1} crece mientras que i_{B2} se reduce. Las corrientes de colector i_{C1} e i_{C2} también cambian, provocando una disminución en la tensión de V_{CE1} y un aumento de V_{CE2} . Escribiendo las ecuaciones de la ley de tensiones de Kirchoff de tensiones desde la alimentación V_{CC} hasta V_{CE3} se tiene:

$$V_{CC} = R_{C1}I_{C1} + V_{CE1} + V_{CE3}$$

Por tanto

$$V_{CC} - V_{CE3} = R_{C1}I_{C1} + V_{CE1}$$

Donde V_{CE3} es una constante. Si acudimos a la ecuación podemos ver que la pendiente de la recta de carga de modo diferencial es $-1/R_{C1}$.

DESARROLLO

Análisis del espejo de corriente

$$-V_{CC} + i_x R_x + 0.7 - V_{EE} = 0$$

Proponiendo

$$I_x = 10\text{mA}$$

$$V_{CC} = 10\text{V}$$

$$V_{EE} = -10\text{V}$$

$$R_x = \frac{V_{CC} + V_{EE} - 0.7}{I_x} = \frac{20 - 0.7}{10\text{mA}} = 1.93\text{K}$$

$$I_x = 10\text{mA}$$

$$\text{Con } R_x = 22\text{K}$$

$$I_x = 8.77 \text{ mA}$$

Análisis de Q1 y Q2

$$V_{CE2} = V_{CC} + 0.7 - I_c(R_c - (R_b/h_{fe}))$$

Para $V_{CE1} = 5 \text{ V}$

$$R_c = (10.7 - 5) / (4.38 \text{ mA}) = 1 \text{ K}$$

$$-10 + (I_{CQ})(1 \text{ K}) + 0.3 - 0.7 - I_c/h_{fe}(4.7 \text{ K}) + V_{a00}$$

Como $I_x = 8.77 \text{ mA}$ $I_{cq} = 4.38 \text{ mA}$

$$V_{amax} = 6 \text{ V}$$

Para V_{amin}

$$-V_a + 0.7 + 0.3 - 10 = 0$$

$$-V_{amin} = -9 \text{ V}$$

Análisis de pequeña señal

Señal de modo común

$$2h_{ob} \gg 45.9$$

$$A_a = 1 \text{ K} / 200 \text{ K} = 5 \text{ M}$$

Señal de modo diferencial

$$H_{ib} = 26 \text{ mV} / 4.38 \text{ mA} = 5.9 \text{ ohms}$$

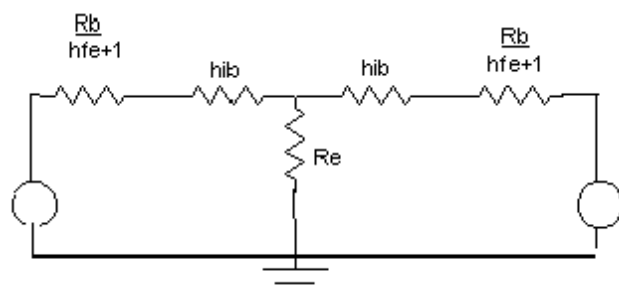
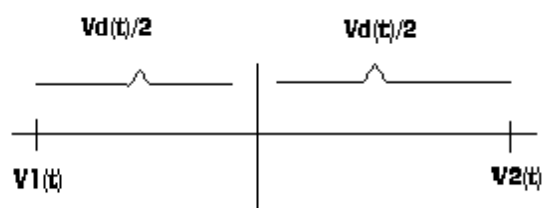
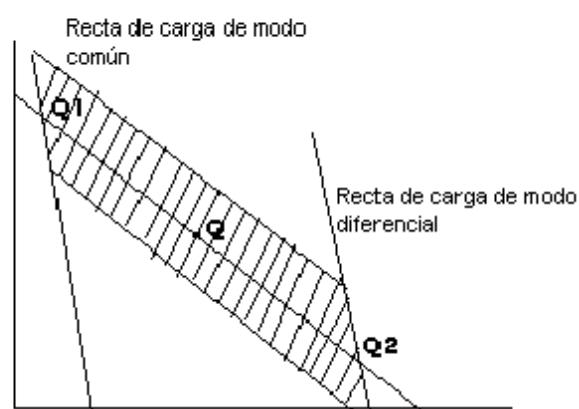
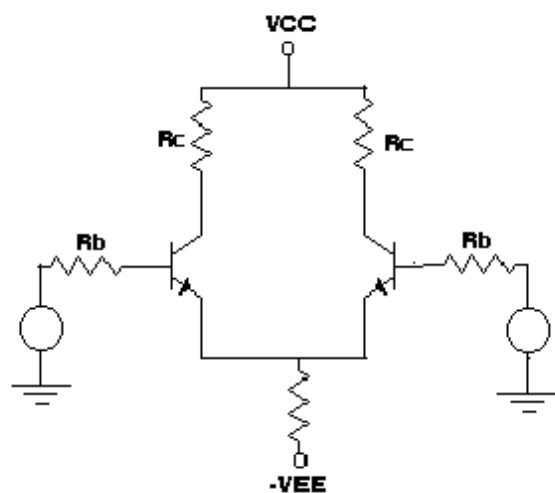
$$V_{dmax} = (8.77 \text{ mA})(5.9 + 40) = 0.4 \text{ V}$$

$$A_d = 1 \text{ K} / 2(45.9) = 10.89$$

Desarrollo de laboratorio

$$m = \frac{(5.9 - 4) \times 10^{-3}}{9.53 - 6.81}$$

$$9.53 - 6.81$$



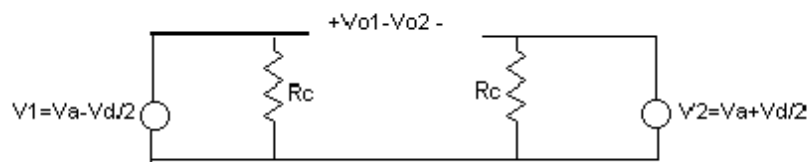


figura 3.5.b

