

CURSO: ELECTRÓNICA ANALÓGICA

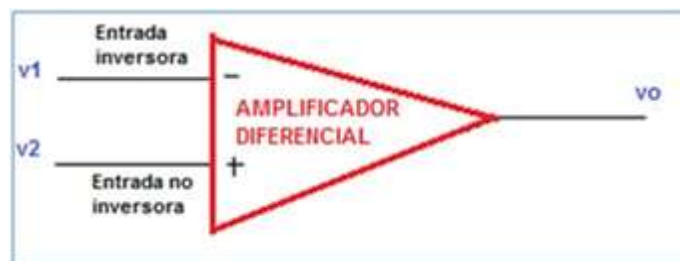
UNIDAD I: EL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL

PROFESOR: JORGE ANTONIO POLANÍA

El amplificador diferencial es un circuito que constituye parte fundamental de muchos amplificadores y comparadores. En esta unidad se describen y analizan diferentes tipos de amplificadores diferenciales su polarización y análisis de pequeña señal introduciendo los conceptos en modo diferencial y modo común que permiten simplificar el análisis de estos amplificadores. Se estudiarán los siguientes temas: Amplificador diferencial con una entrada, Amplificador diferencial con dos entradas y Polarización del amplificador diferencial.

INTRODUCCIÓN

El amplificador diferencial (AD) es un circuito utilizado para amplificar la diferencia de dos señales v_1 y v_2 como se indica en la figura.



El amplificador diferencial AD representado por el bloque de la figura, tiene dos entradas, una de ellas definida como inversora (-) y la otra como no inversora (+), y una salida. Las entradas son excitadas con dos señales v_1 y v_2 , se define:

viD, como la señal de entrada diferencial, esto es, la diferencia entre la señal aplicada a la entrada inversora, vi (-) y la señal aplicada a la entrada no inversora, vi (+):

$$v_{iD} = v_{i(-)} - v_{i(+)} = v_1 - v_2$$

viC, como la señal de entrada a modo común, como la semisuma de las dos entradas:

$$v_{iC} = \frac{v_{i(-)} + v_{i(+)}}{2} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

En consecuencia, es posible expresar:

$$v_1 = v_{iC} + \frac{v_{iD}}{2} \qquad v_2 = v_{iC} - \frac{v_{iD}}{2}$$

En esta unidad estudiaremos el AD con una sola entrada haciendo la señal $v_2=0$, con las dos entradas en modo diferencial cuando las señales $v_1= - v_2$, en modo común cuando $v_1= v_2$, la relación de rechazo modo común MCRR y su polarización utilizando una simple resistencia de emisor o una fuente de corriente.

1. AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA

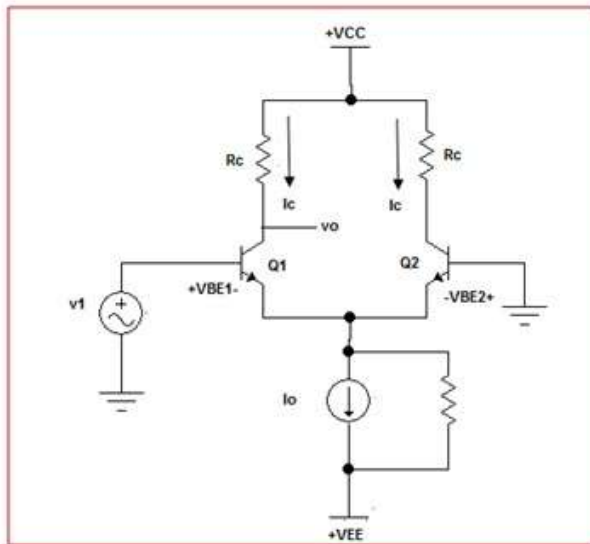
Se hace $v_2=0$ como se indica en la figura, siendo, I_0 = la fuente de corriente constante; R_n = resistencia de la fuente de corriente. Se supone que los transistores son idénticos, esto es,

$$V_{BE1} = V_{BE2},$$

Por lo que la corriente de colector es la mitad de la fuente de corriente I_0 ,

$$I_c = I_0 / (2 \cdot Q1), \quad V_{EE} \text{ es una fuente de valor negativo.}$$

La amplificación de voltajes se deduce de la siguiente forma:



AMPLIFICACIÓN DE VOLTAJE

$$A_v = \frac{v_o}{v_1} = -\frac{\beta R_c}{2r_\pi}$$

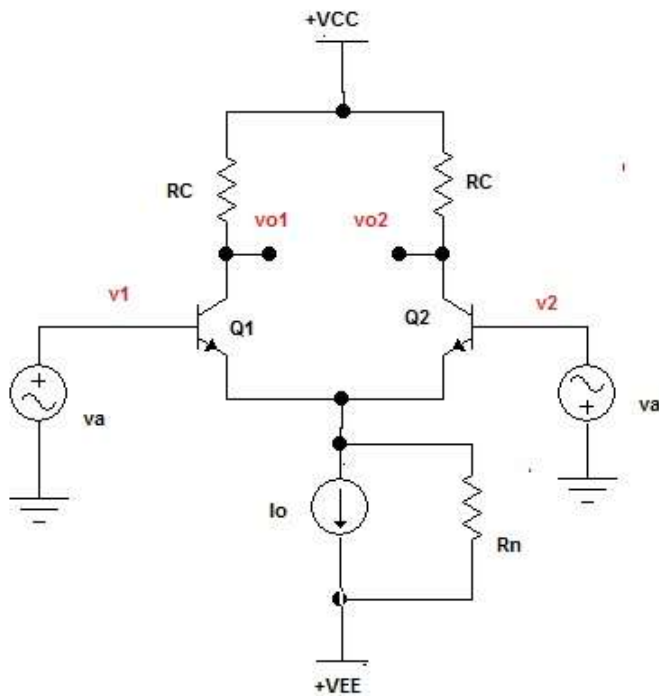
$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m}, \quad g_m = \frac{I_c}{V_T}$$

$$V_T = 25 \text{ mV}$$

β es la amplificación del transistor

r_π , β y g_m son parámetros del transistor.

2. AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO DIFERENCIAL



$$v_1 = v_a, \quad v_2 = -v_a$$

Modo común:

$$v_{im} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 0$$

Modo diferencial:

$$v_{idm} = v_1 - v_2 = 2v_a$$

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

$$v_{o1} = -\frac{\beta R_c}{r_\pi} v_a$$

$$v_{o2} = \frac{\beta R_c}{r_\pi} v_a$$

Las entradas v_1 y v_2 son iguales a: $v_1 = v_a$ y $v_2 = -v_a$

V_{idm} = voltaje de entrada diferencial

V_{im} = voltaje de entrada modo común

Es un circuito simétrico, no hay señal a través de R_n y el emisor se comporta como TIERRA VIRTUAL.

Si definimos:

A_{dm1} = ganancia diferencial en terminal 1

A_{dm2} = ganancia diferencial en terminal 2

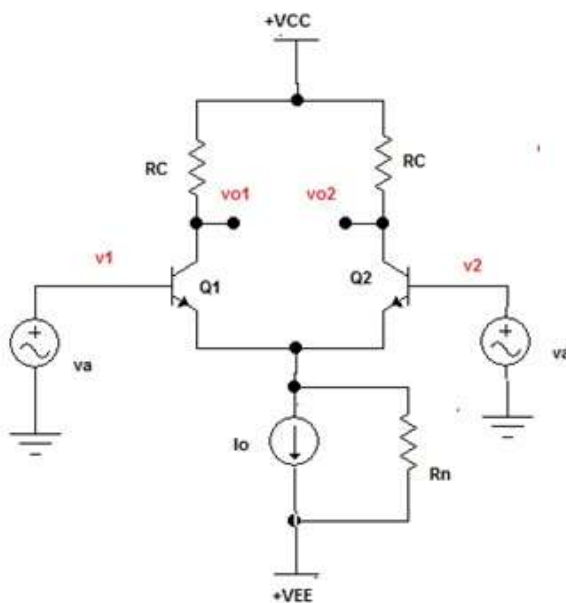
A_{dmdif} = ganancia modo diferencial del circuito,

entonces,

$$A_{dm1} = \frac{v_{o1}}{v_{idm}} = -\frac{\frac{\beta R_c * v_a}{r_{\pi}}}{2v_a} = -\frac{\beta R_c}{2r_{\pi}}, \quad A_{dm2} = \frac{v_{o2}}{v_{idm}} = \frac{\frac{\beta R_c * v_a}{r_{\pi}}}{2v_a} = \frac{\beta R_c}{2r_{\pi}}$$

$$A_{dmdif} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{idm}} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi}} = A_{dm1} - A_{dm2}$$

3. AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO COMÚN



$$\begin{aligned} v_1 &= v_a, & v_2 &= v_a \\ v_{idm} &= v_1 - v_2 = 0 \\ v_{icm} &= \frac{v_1 + v_2}{2} = v_a \\ v_{o1} &= v_{o2} = -\frac{\beta R_c * v_a}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_n} \end{aligned}$$

Las dos entradas v_1 y v_2 son iguales y además tienen la misma polaridad, esto es: $v_1 = v_a$, $v_2 = v_a$. Por tanto,

$v_1 - v_2 = 0$. Las salidas son iguales a:

En esta configuración no hay tierra virtual, se debe tener en cuenta R_n (resistencia de la fuente).

Ganancia común en los terminales 1 y 2:

$$A_{cm1} = \frac{v_{o1}}{v_{icm}} = \frac{v_{o1}}{v_a} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_n}$$

$$A_{cm2} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} = \frac{v_{o2}}{v_a} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_n}$$

Las ganancias son iguales, entonces:

$$A_{cmdif} = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{2} = A_{cm1} - A_{cm2} = 0$$

La ganancia diferencial en modo común idealmente = 0.

4. RELACIÓN DE RECHAZO MODO COMÚN - CMRR

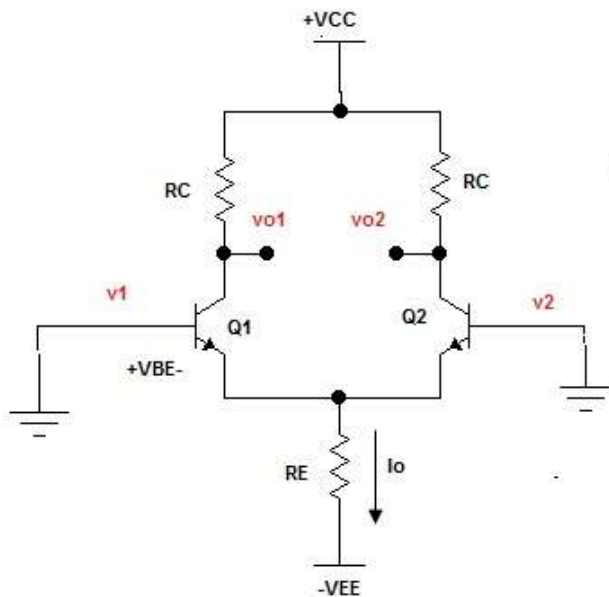
Lo que se requiere en un amplificador diferencial es que tenga una ganancia en modo diferencial grande y una ganancia en modo común pequeña para que rechace la señal que está en modo común. El grado de rechazo se denomina: Relación de rechazo en modo común - CMRR y es igual a la relación entre estas ganancias, como se indica:

$$CMRR = \frac{|A_{dm}|}{|A_{cm}|} = 20 \log \left| \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \right| \text{ en decibeles, para } v_1 \neq v_2$$

$$CMRR \approx \frac{\beta R_n}{r_{\pi}} = g_m * R_n$$

5. POLARIZACIÓN CON RESISTENCIA DE EMISOR

Es una forma sencilla de polarizar el AD polarizando los transistores colocando una resistencia común RE en los emisores de los transistores a una fuente de voltaje -VEE, como se indica en la figura.



Se polariza con una resistencia RE y con la fuente VEE.

Las señales en polarización se hacen cero (fuentes muertas)

$$I_o = \frac{-V_{BE} - V_{EE}}{R_E}$$

$$A_{dm2} = \frac{\beta R_c}{2r_{\pi}} = \frac{g_m R_c}{2}$$

$$A_{cm2} = -\frac{\beta R_c}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_E}$$

$$A_{cm2} \approx -\frac{R_c}{2R_E}$$

EJEMPLO 1:

Un amplificador diferencial tiene una señal de entrada diferencial ($v_1 - v_2$) de 20 mV y se requiere a la salida del terminal 2 una señal amplificada de 1 V. Existe una señal de ruido en cada entrada que se debe rechazar por un factor de 5. Si la polarización se realiza con $V_{CC} = 15V$, $V_{EE} = -15V$, $R_E = 10K\Omega$, hallar CMRR.

Solución

$$v_{idm} = 20mV, v_{o2} = 1V, \text{ entonces, } A_{dm2} = v_{o2} / v_{idm} = 1V / 20mV = 50, A_{dm2} = 50$$

$$A_{dm2} = \frac{g_m R_c}{2} = \frac{I_c R_c}{V_T} = \frac{V_{Rc}}{2V_T}, \text{ despejando } V_{Rc}$$

$$V_{Rc} = A_{dm2} * 2V_T = 50 * 2 * 25mV = 100 * 0,025 = 2,5V$$

$$A_{cm2} = \frac{v_{o2}}{v_{icm}} = \frac{1}{5} = \frac{R_c}{2R_E}, \text{ entonces, } R_c = 0,4R_E, \text{ o menor}$$

Si $RE=10K$, entonces, $Rc=0,4*RE=0,4*10K=4K$, escoger $Rc=3,3K$

$$VRE = -VBE - VEE = -0,7 + 15 = 14,3V,$$

$$Io = \frac{VRE}{RE} = \frac{14,3}{10K} = 1,43 \text{ mA}, \quad Ic = \frac{Io}{2} = 0,72 \text{ mA}$$

$$Acm2 = \frac{Rc}{2RE} = \frac{3,3K}{2 * 10K} = 0,165$$

El nuevo $Adm2$ es igual a:

$$Adm2 = \frac{gmRc}{2} = \frac{Ic Rc}{VT 2} = \frac{0,72 \text{ mA} * 3,3K\Omega}{25 \text{ mV} * 2} = 47$$

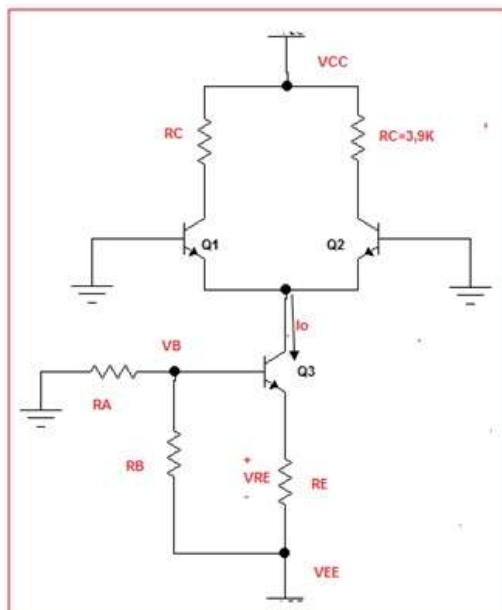
$$CMRR = \frac{Adm2}{Acm2} = \frac{47}{0,165} = 284,8, \quad CMRR = 20 \log(284,8) = 49,1 \text{ dB}$$

Entre más alto sea el valor de MCRR, mejor será el amplificador diferencial.

6. POLARIZACIÓN CON FUENTE DE CORRIENTE

La polarización se realiza por medio de una fuente de corriente utilizando un transistor Q3 en los emisores.

EJEMPLO 2:



a) CÁLCULO DE RE

Datos:

$$RA=470\Omega, RB=5K, Rc=3,9K, VEE=-15V$$

$$VB = \frac{RA}{RA + RB} * VEE = \frac{0,47}{0,47 + 5} (-15)$$

$$VB = -1,3V$$

$$VRE = VB - VBE - VEE$$

$$VRE = -1,3 - 0,7 + 15 = 13V$$

De ejemplo anterior $Io = 1,43 \text{ mA}$

$$Io \approx IE3 = \frac{VRE}{RE} = 1,43 \text{ mA}$$

$$RE = \frac{13}{1,43} = 9,1K\Omega$$

b) Cálculo de R_n

$$R_n = r_{o3} \left[1 + \frac{\beta_3 R_E}{R_E + r_{\pi 3} + R_p} \right], \quad R_p = R_A \parallel R_B = \frac{0,47 * 5}{0,47 + 5} = 430 \Omega$$

Parámetros del transistor: $r_{o3}=50K$, $\beta_3=100$

$$r_{\pi 3} = \frac{\beta_3}{g_{m3}} = \frac{\beta_3 V_T}{I_{E3}} = \frac{100 * 0,025}{1,43} = 1,75 K \Omega$$

$$R_n = 50 \left[1 + \frac{100 * 9,1}{9,1 + 1,75 + 0,43} \right] = 4083 = 4,1 M \Omega$$

c) GANANCIA COMÚN EN UN TERMINAL

$$A_{cm1} = - \frac{\beta R_c}{r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_n} \approx - \frac{R_c}{2R_n} = - \frac{3,9K}{2 * 4,1M} = 4,75 * 10^{-4}$$

En el ejemplo anterior no había dado $A_{cm}=0,165$, o sea, $0,165/4,75*10^{-4}=347$ veces menor

CURSO: ELECTRÓNICA ANALÓGICA

UNIDAD I: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL - SIMULACIÓN

PASO 1: DIFERENCIAL CON UNA ENTRADA

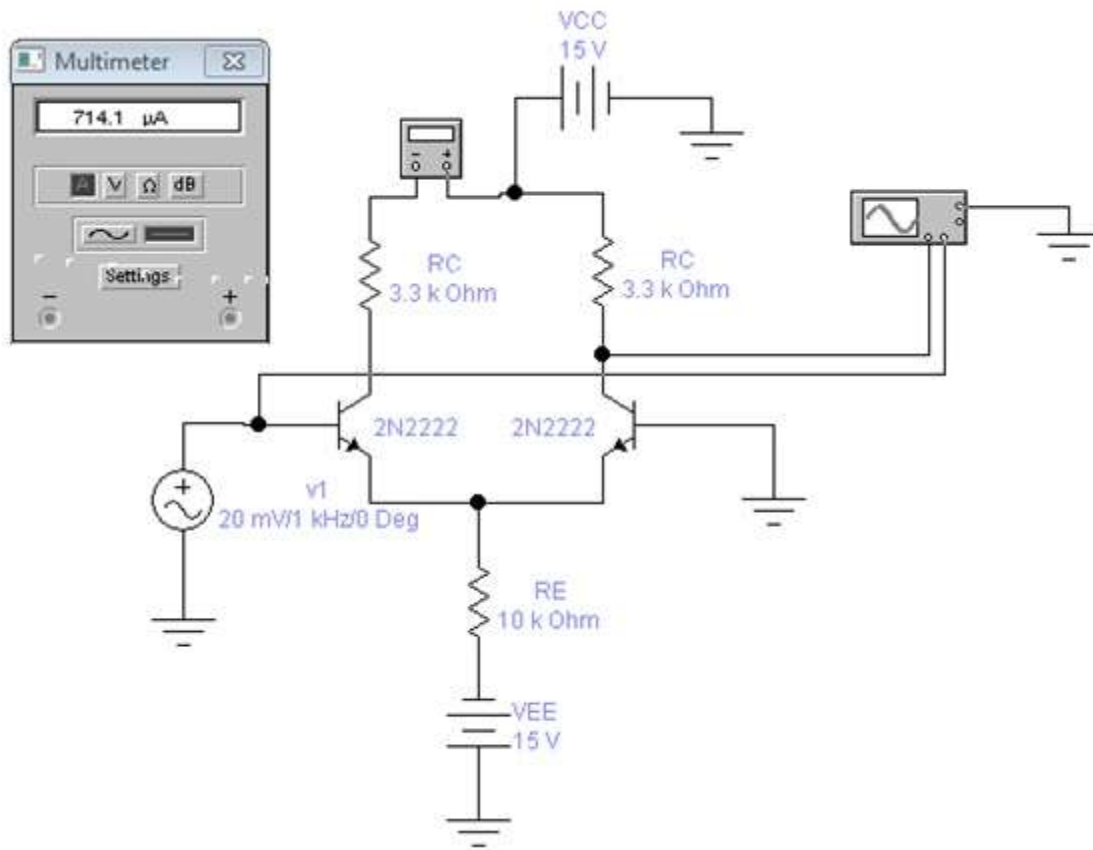
En la figura se tiene un amplificador diferencial con una entrada v1 simulado en Workbench (v2 = 0).

Como señal de entrada se ha considerado una senoidal de $20 \text{ mVrms} = 28 \text{ mVpp}$ a 1 KHz .

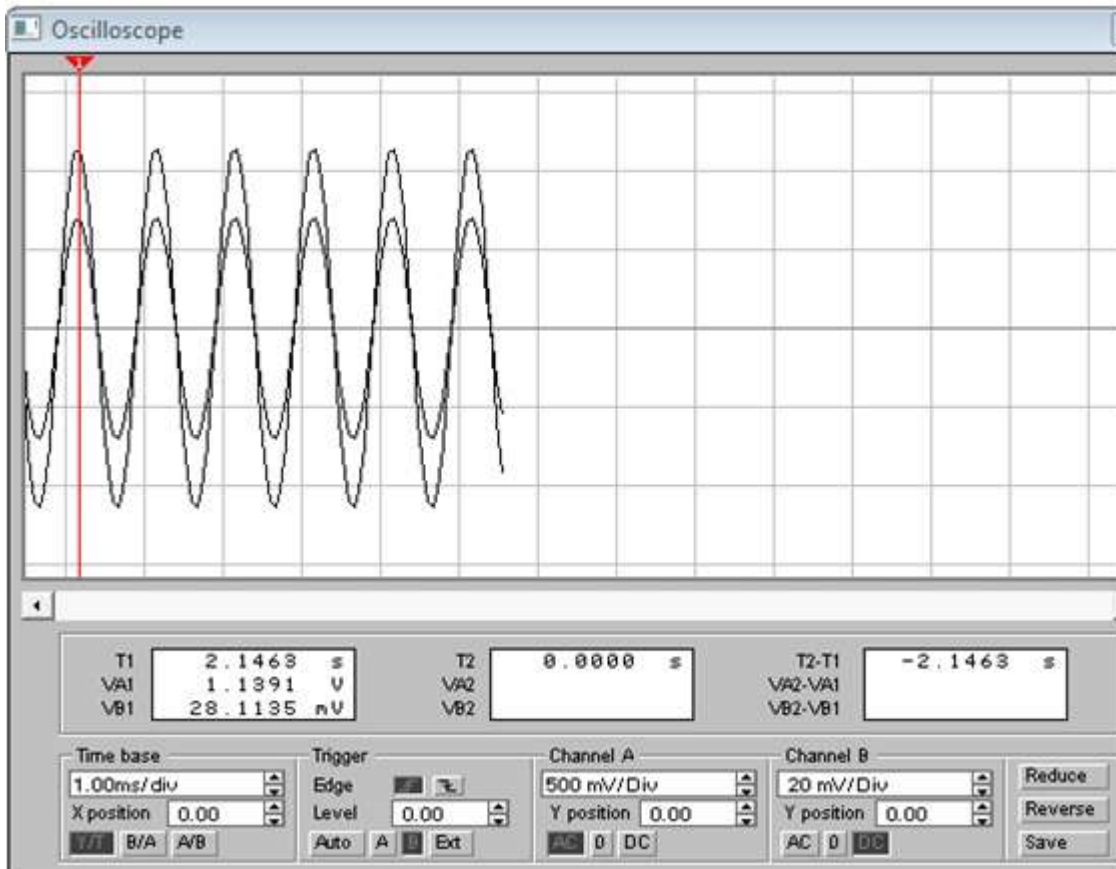
Fuentes de polarización de 15 V y -15 V y como transistores se han utilizado el $Q1=Q2=2\text{N}2222$, $R_C = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_E = 10 \text{ k}\Omega$

Mida la corriente de colector colocando un multímetro en serie con R_C como se aprecia en la figura. Anote este resultado como: $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$

La corriente en $R_E = I_o$ es aproximadamente: $I_o = 2 * I_C = \underline{\hspace{2cm}}$



En la salida del transistor Q2 coloque un osciloscopio para observar y medir el voltaje de entrada y de salida.



$v_1 =$ _____

$v_{o2} =$ _____

Calcule la ganancia del amplificador diferencial, según lo observado en el osciloscopio, como,

$A_v = v_{o2} / v_1 =$ _____

Valide este resultado comprobándolo teóricamente.

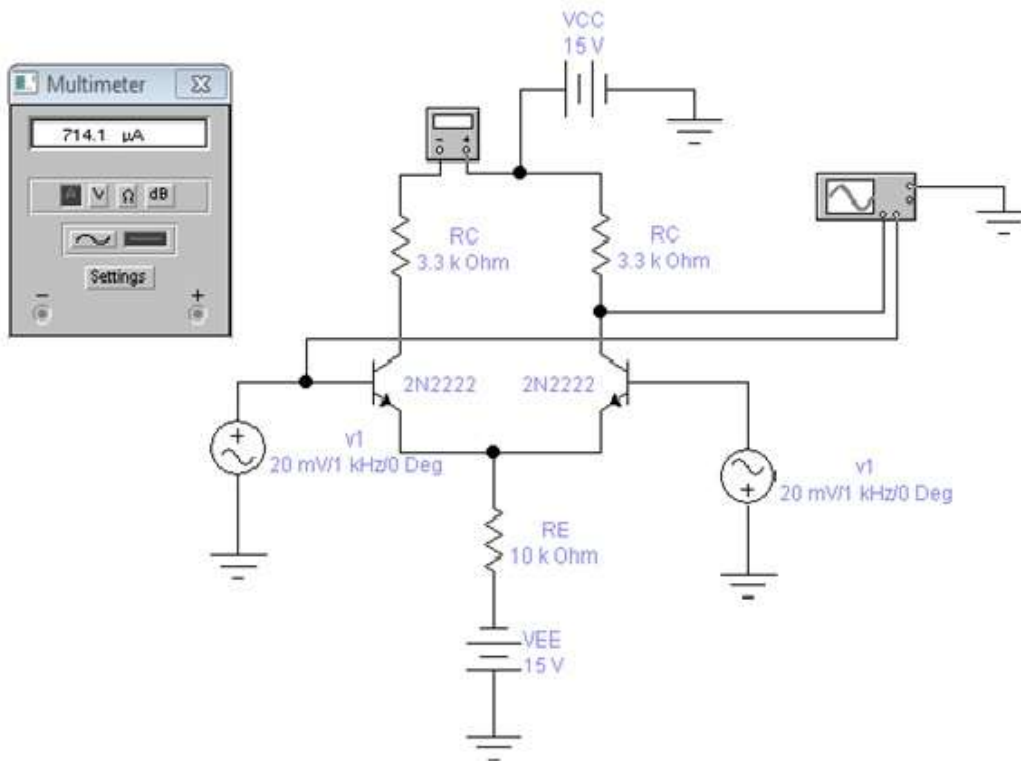
PASO 2: DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO DIFERENCIAL

Simule el circuito de la figura en modo diferencial con: $v_1=20\text{ mV}$, $v_2= - 20\text{ mV}$ (polaridad opuesta).

Mida el valor de I_C con el multímetro colocado en serie con R_C y calcule la corriente de polarización:

$I_C =$ _____

$I_o =$ _____

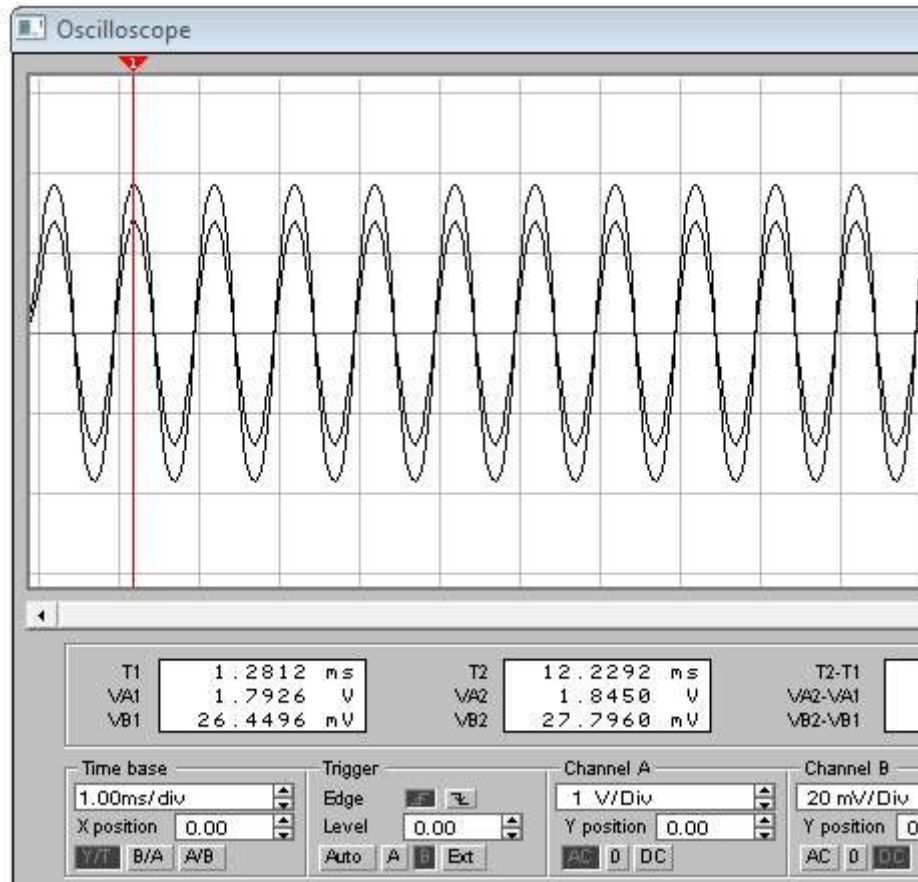


Observe la señal dada en el osciloscopio para la entrada y salida del amplificador. Anote estos resultados:

Entrada $v_1 =$ _____

salida $v_o2 =$ _____ , la salida está en fase con la entrada?

Voltaje de entrada diferencial de: $v_{idm} =$ _____



La amplificación de voltajes es de:

$$Adm2 = v_{o2} / v_{idm} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Encuentre $Adm1$ y $Admdif$.

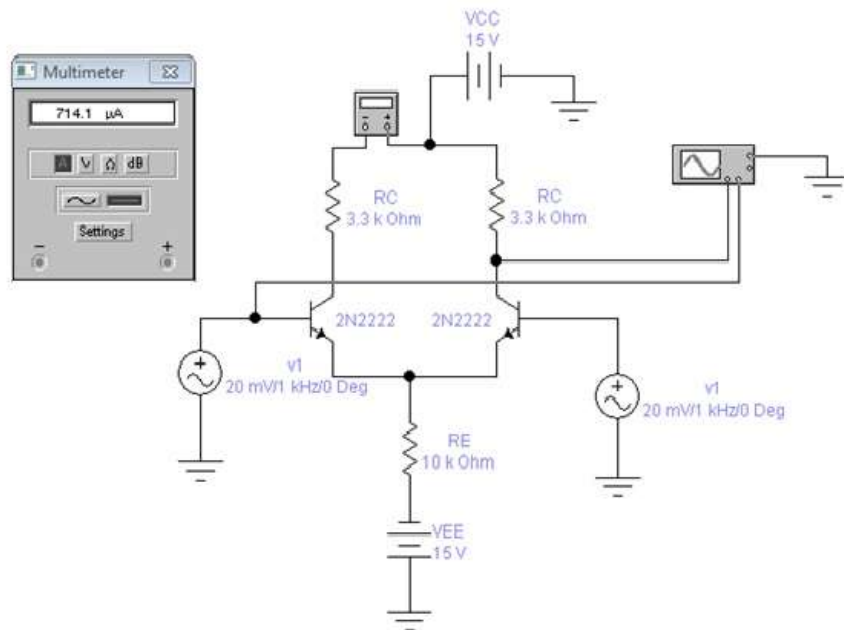
Compruebe estos resultados dados por el simulador de forma teórica.

PASO 3: DIFERENCIAL CON DOS ENTRADAS: MODO COMÚN

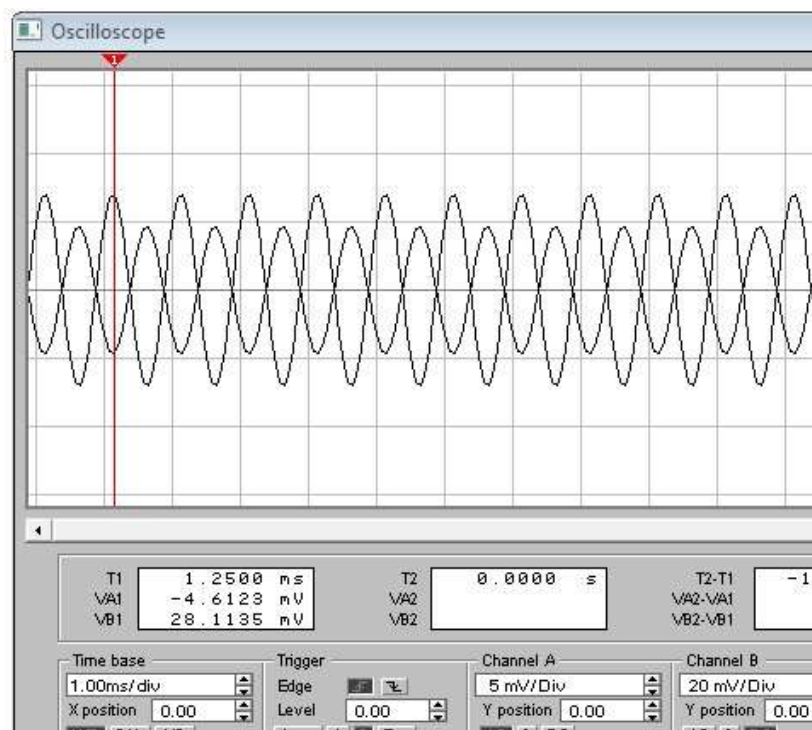
Simule el circuito de la figura con: $v_1 = v_2 = 20mV$, igual polaridad. Mida la corriente de colector y de polarización.

$$I_C = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$I_o = \underline{\hspace{2cm}}$$



La salida dada en el osciloscopio está desfasada 180 grados respecto a la entrada. $v_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $v_02 = \underline{\hspace{2cm}}$



Encuentre A_{cm1} y A_{cm2} . Compruebe los datos teóricamente.

CURSO: ELECTRÓNICA ANALÓGICA

UNIDAD I: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL - LABORATORIO

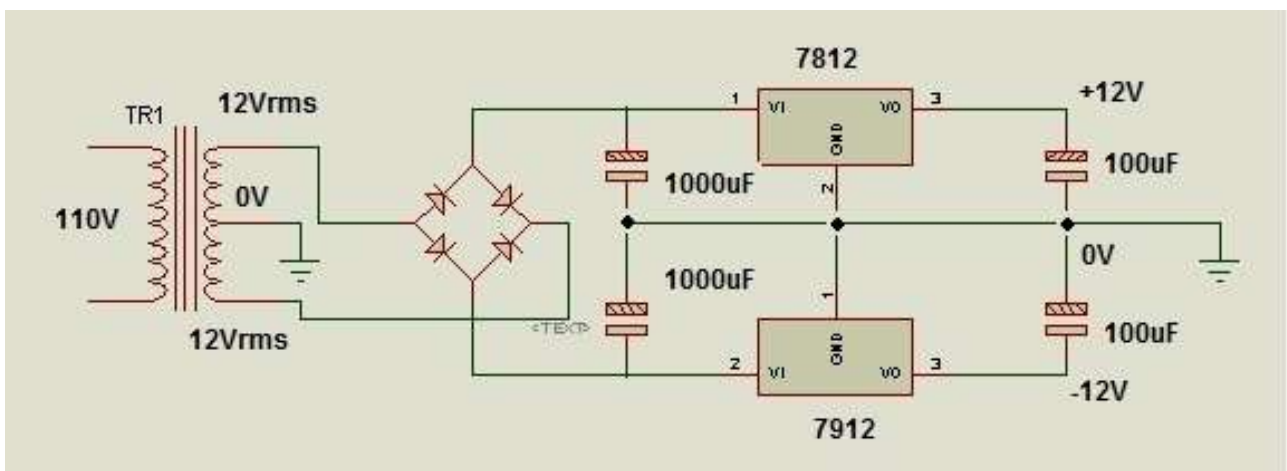
El objetivo de este laboratorio es comprobar de modo práctico la ganancia de un amplificador diferencial en modo diferencial y en modo común utilizando como polarización una resistencia de emisor y una fuente de corriente y la relación de rechazo en modo común en ambas opciones.

EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO

- Osciloscopio
- Generador de señales
- Fuente de $\pm 12V$
- Multímetro
- Protoboard
- 3 transistores 2N2222
- 2 condensadores de 10 μF / 35V
- Resistencias a 1/4W de: 2x3.9K, 2x560K, 6.8K, 5.1K y 470 Ω
- Conectores

FUENTE DE VOLTAJE DE $\pm 12V$

Esta es la fuente de voltaje que vamos a utilizar en la práctica.

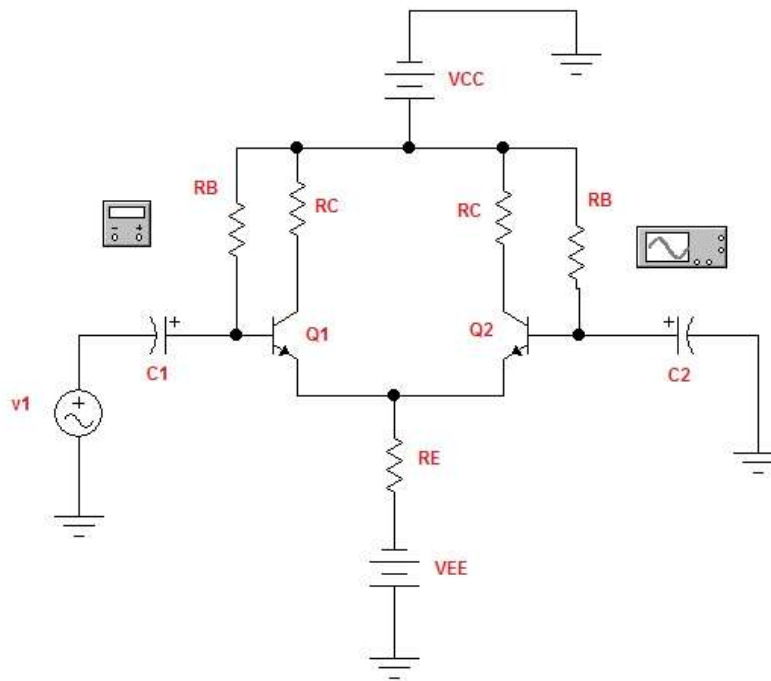


PASO 1: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON POLARIZACIÓN RE

Implemente el amplificador diferencial de la figura con: $V_{CC} = 12V$, $V_{EE} = -12V$, $R_C = 3.9\text{ K}\Omega$, $R_B = 560\text{ K}\Omega$, $R_E = 6.8\text{ K}\Omega$,

$C_1 = C_2 = 10\mu F$, $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 2N2222$. Utilice una señal de entrada v_1 de $0.1V$ a 1 KHz .

a) Sin aplicar la señal haga las mediciones para encontrar la corriente de colector I_C y la corriente que pasa por la resistencia $R_E = I_o$. Encuentre el valor de β del transistor.



$I_C = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$, $\beta = \underline{\hspace{2cm}}$, $I_o = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Aplique la señal y con el osciloscopio encuentre la ganancia en modo diferencial. Compruebe el resultado teóricamente.

$A_{dm} = \underline{\hspace{2cm}}$

c) Aplique idéntica señal a las bases de los transistores para encontrar la ganancia en modo común.

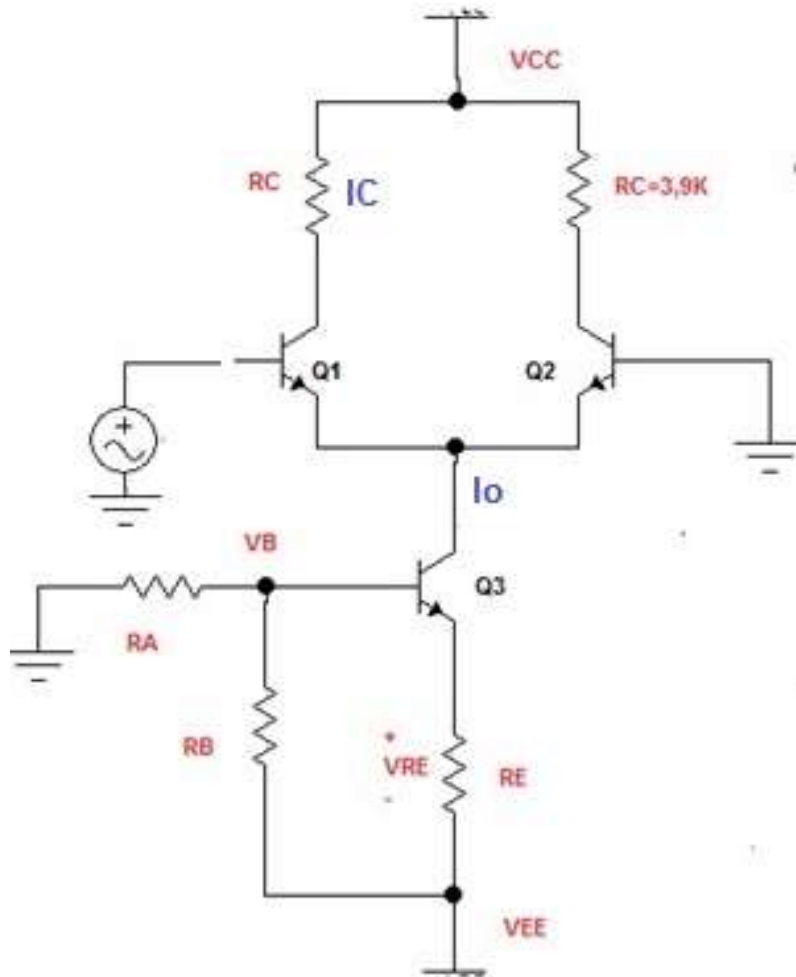
$A_{cm} = \underline{\hspace{2cm}}$

d) Encuentre la relación de MCRR en decibeles

CMRR = _____

PASO 2: AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON FUENTE DE CORRIENTE

Repita el procedimiento anterior para el amplificador de la figura. $R_A=470\Omega$, $R_B=5.1K\Omega$, $R_E=6.8K\Omega$. No olvide la polarización de base de los transistores Q1 y Q2 y los condensadores.



$A_{dm} =$ _____, $A_{cm} =$ _____, $CMRR =$ _____

Explique la diferencia entre los dos modelos de amplificador diferencial.