

ELECTRONICA APLICADA I

Profesor Titular Ing. Guillermo Riva

Profesor Adjunto Ing. Martín Guido

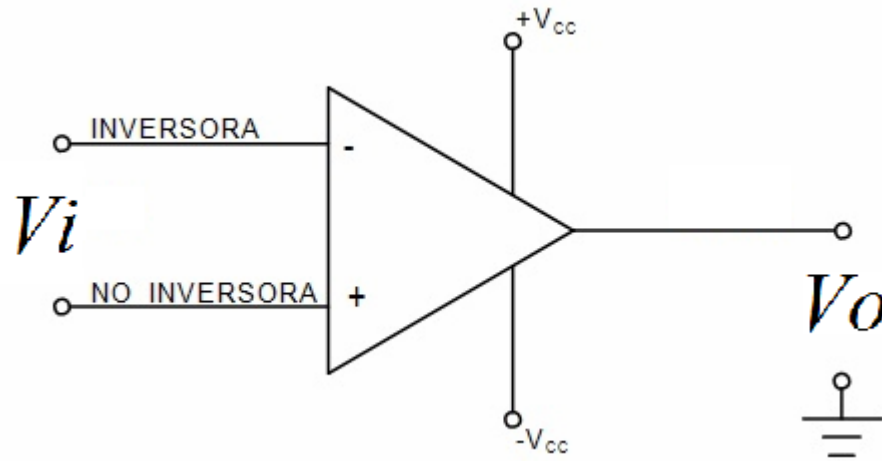
Amplificador Operacional.

- Introducción.
- Diagrama en bloques del circuito interno.
- Características ideales.
- Tensión de offset de salida y tensión de offset de entrada
- Circuito.
- Análisis en corriente continua.
- Circuito equivalente para corriente alterna.
- Relación de rechazo a modo común.
- Ejemplo.
- Impedancia de entrada.
- Impedancia de salida.

El Amplificador Operacional.

Introducción

El amplificador operacional permite realizar una amplia variedad de operaciones lineales y no lineales con solo agregarle algunos componentes externos. Se lo encuentra como un circuito integrado.

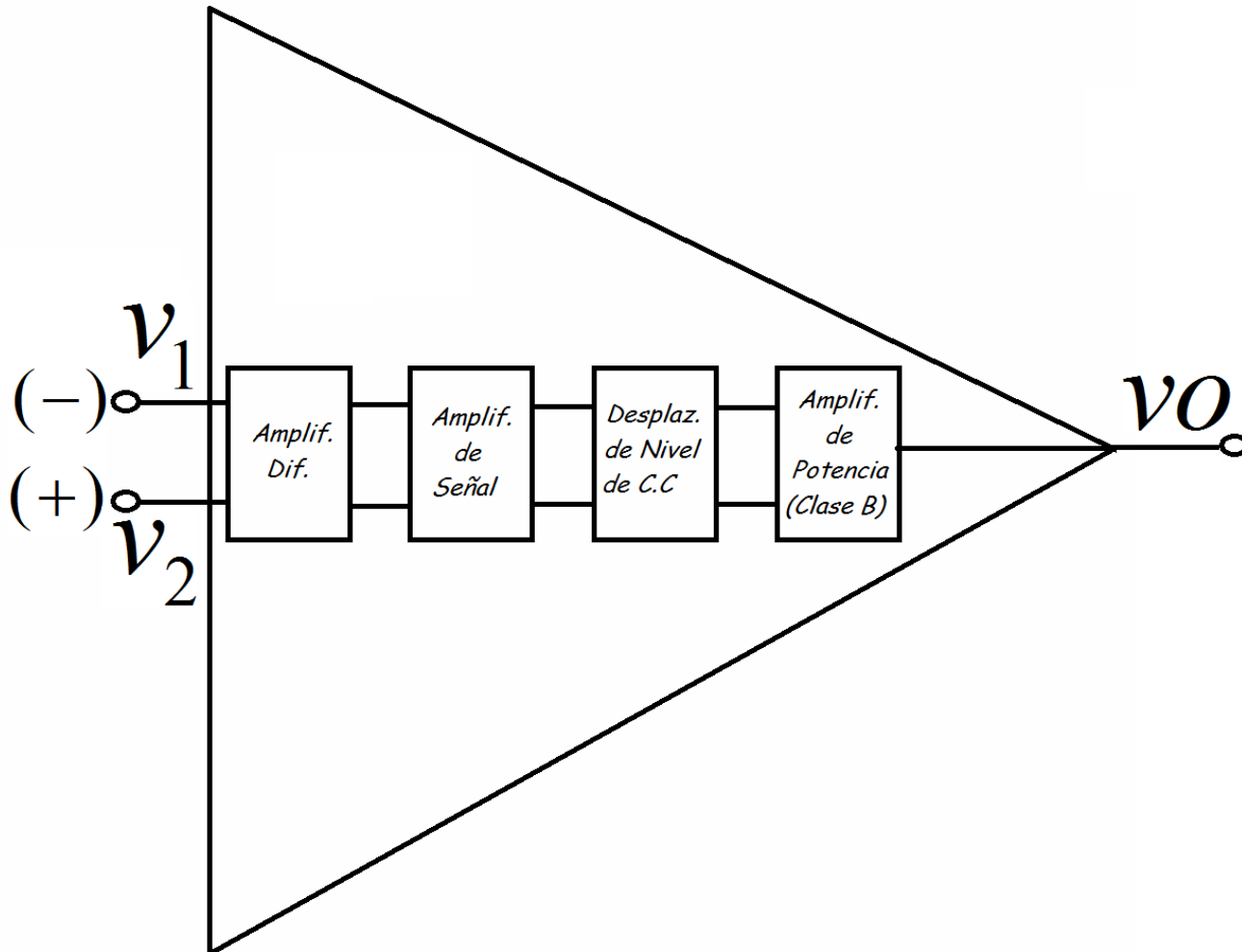


Ejemplos de operaciones

Amplificador inversor y no inversor, sumador, restador, multiplicador, integrador, diferenciador, amplificador logarítmico, rectificador ideal, etc.

El Amplificador Operacional.

Diagrama en bloques del circuito interno:



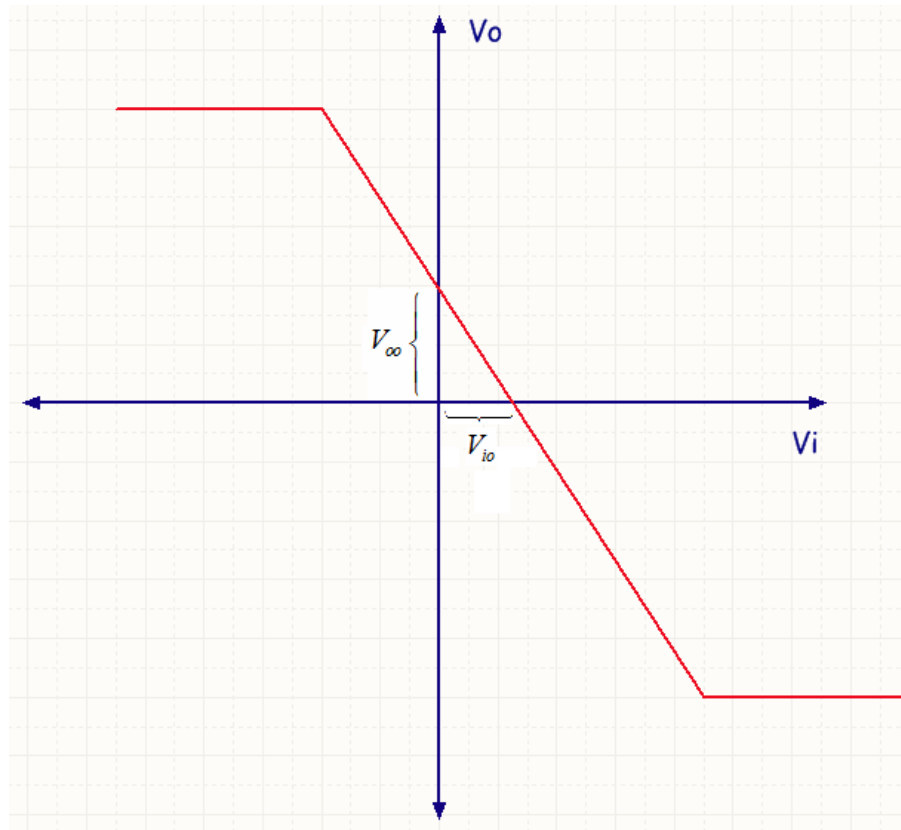
El Amplificador Operacional.

CARACTERÍSTICAS IDEALES:

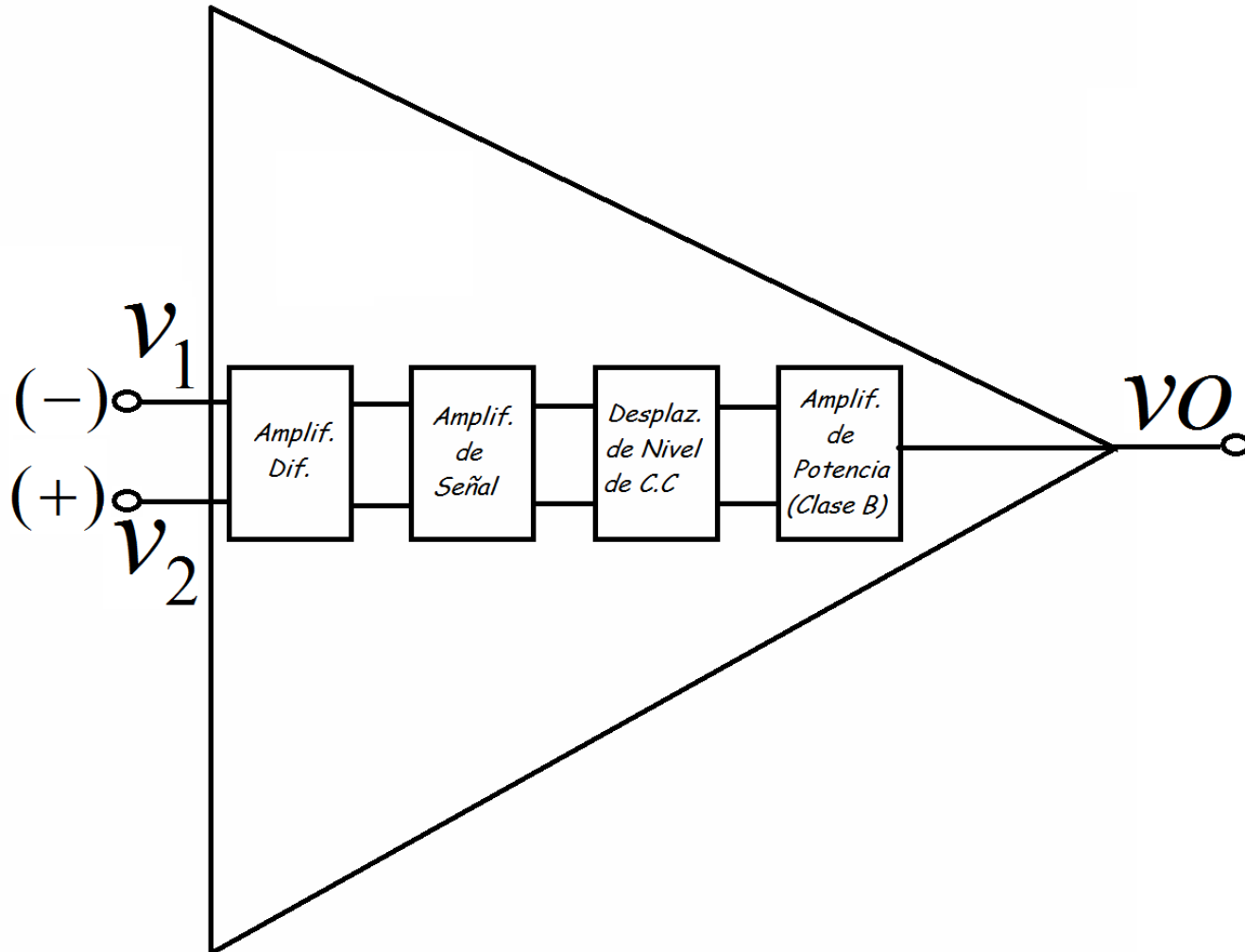
- Ganancia de tensión en lazo abierto infinita.
- Ancho de banda en lazo abierto infinita.
- Relación de Rechazo a Modo Común infinita.
- Impedancia de entrada infinita
- Impedancia de salida nula.
- Corriente de polarización de entrada nula.
- Ruido nulo.
- Tiempo Crecimiento nulo.

El Amplificador Operacional.

- Tensión de offset de salida (es la tensión de salida para cuando la entrada es cero, se denomina V_{oo}).
- Tensión de offset de entrada (tensión que hay que aplicar en la entrada para que la tensión a la salida sea cero, se denomina V_{io}).

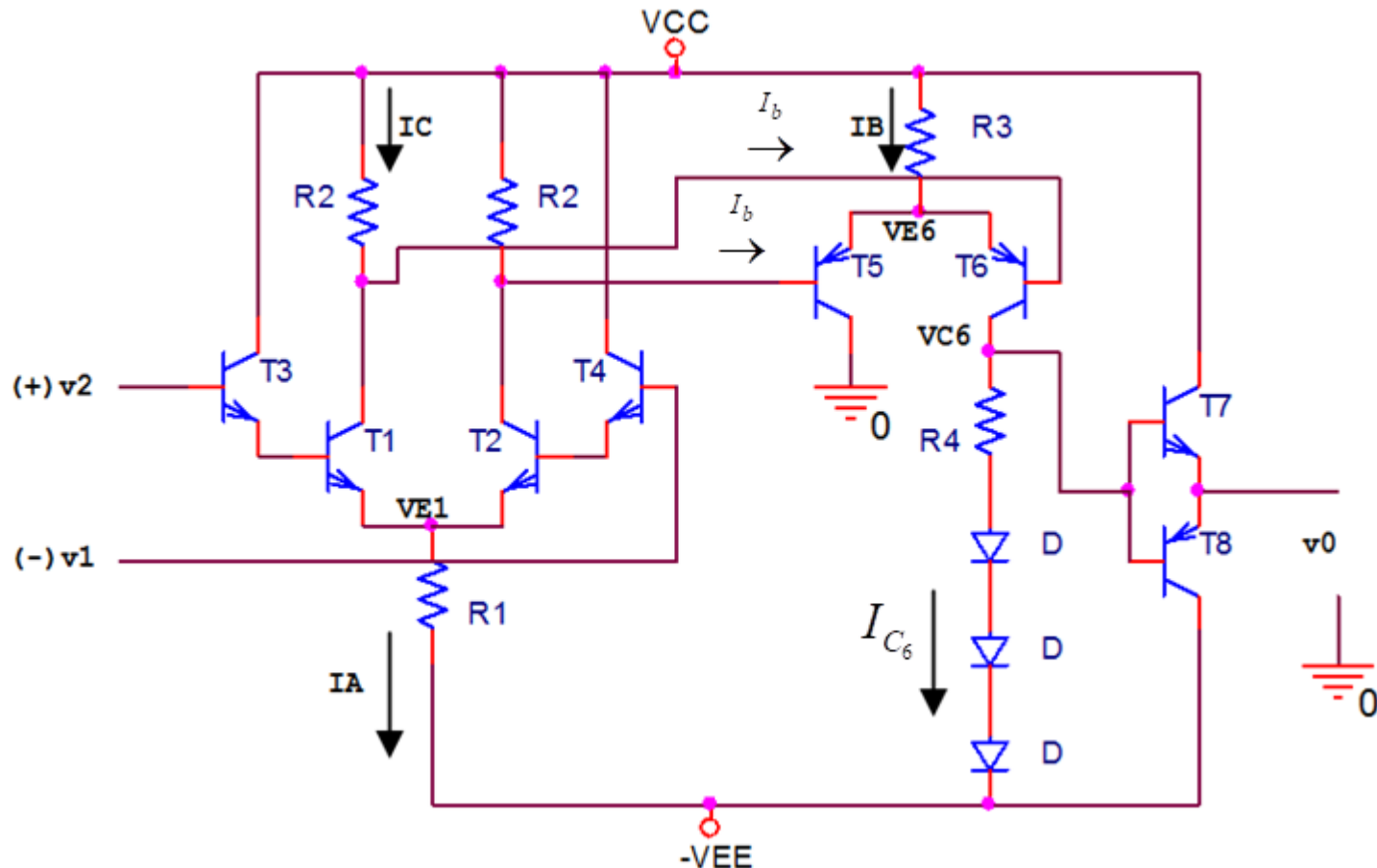


El Amplificador Operacional.



Estructura interna del Amplificador Operacional.

*Circuito interno del amplificador operacional
LH0005 de NATIONAL*



Estructura interna del Amplificador Operacional.

Descripción del circuito

Etapas de entrada : Amplificador diferencial Darlington que le confiere alta impedancia de entrada con salida simétrica.

Segunda etapa : consta de un amplificador diferencial que toma la señal de entrada de la salida simétrica del primero.

Una de las ramas de este actúa como desplazador de nivel junto con la resistencia R_4 y tres diodos en serie.

Etapas de salida : Amplificador clase B, T_7 amplifica los semiciclos positivos y T_8 los semiciclos negativos. No está el circuito para corregir la distorsión por cruce por cero.

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Análisis en corriente continua

Se busca la relación de resistencias de colector y emisor adecuadas para que la salida del amplificador operacional sea cero cuando las dos entradas están a cero.

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Análisis en corriente continua.

$$\left. \begin{array}{l} v_1 = 0 \\ v_2 = 0 \end{array} \right\} v_o = 0 \quad \left| \begin{array}{l} I_b \ll I_C \\ V_{BE} = V_D \\ V_{CC} = V_{EE} \end{array} \right.$$

$$V_{EE} - 2V_D - I_A R_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_A = \frac{V_{EE} - 2V_D}{R_1} = 2I_C$$

$$I_C = \frac{I_A}{2} = \frac{V_{EE} - 2V_D}{2R_1} = \frac{V_{EE}}{2R_1} - \frac{2V_D}{2R_1} = \frac{V_{EE}}{2R_1} - \frac{V_D}{R_1}$$

$$V_{C_1} = V_{CC} - I_C R_2 = V_{CC} - \left(\frac{V_{EE}}{2R_1} - \frac{V_D}{R_1} \right) R_2 = V_{CC} - \frac{V_{EE}}{2R_1} R_2 + \frac{V_D}{R_1} R_2$$

$$V_{E_6} = V_{C_1} + V_D = V_{CC} - \frac{V_{EE}}{2R_1} R_2 + \frac{R_2}{R_1} V_D + V_D$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{E_6}}{R_3} = \frac{V_{CC}}{R_3} - \frac{V_{E_6}}{R_3} = \frac{V_{CC}}{R_3} - \frac{1}{R_3} \left(V_{CC} - \frac{V_{EE}}{2R_1} R_2 + \frac{R_2}{R_1} V_D + V_D \right)$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_3} - \frac{V_{CC}}{R_3} + \frac{R_2}{2R_1 R_3} V_{EE} - \frac{R_2}{R_1 R_3} V_D - \frac{1}{R_3} V_D = \frac{R_2}{2R_1 R_3} V_{EE} - \frac{R_2}{R_1 R_3} V_D - \frac{1}{R_3} V_D$$

$$I_{C_6} = \frac{I_B}{2} = \frac{R_2}{4R_1 R_3} V_{EE} - \frac{R_2}{2R_1 R_3} V_D - \frac{1}{2R_3} V_D$$

$$V_{C_6} = I_{C_6} R_4 + 3V_D - V_{EE} = \frac{R_2 R_4}{4R_1 R_3} V_{EE} - \frac{R_2 R_4}{2R_1 R_3} V_D - \frac{R_4}{2R_3} V_D + 3V_D - V_{EE} = V_0 = 0$$

$$V_{C_6} = \frac{R_2 R_4}{4R_1 R_3} V_{EE} - V_{EE} - \frac{R_2 R_4}{2R_1 R_3} V_D - \frac{R_4}{2R_3} V_D + 3V_D = 0$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Sacamos factor comun V_{EE} y V_D :

$$V_{C_6} = \left[\frac{R_2 R_4}{4R_1 R_3} - 1 \right] V_{EE} + \left[-\frac{R_2 R_4}{2R_1 R_3} - \frac{R_4}{2R_3} + 3 \right] V_D = 0$$

Para que V_{C_6} sea cero hacemos igual a cero la expresion de los corchetes

$$V_{C_6} = [0]V_{EE} + [0]V_D = 0 \quad (\text{y nos independizamos de } V_{EE} \text{ y } V_D)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R_2 R_4}{4R_1 R_3} - 1 = 0 \\ -\frac{R_2 R_4}{2R_1 R_3} - \frac{R_4}{2R_3} + 3 = 0 \end{array} \right\} \text{Deben cumplirse estas dos condiciones.}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

$$Si : h_{fe} = 100$$

$$R_3 = R_1 = 5K\Omega \text{ (emisor)}$$

$$R_4 = R_2 = 10K\Omega \text{ (colector)}$$

$$\frac{R_2 R_4}{4 R_1 R_3} - 1 = 0$$

$$\frac{10K\Omega \times 10K\Omega}{4 \times 5K\Omega \times 5K\Omega} - 1 = 0$$

$$\frac{100K^2\Omega}{100K^2\Omega} - 1 = 0$$

$$0 = 0$$

$$\frac{R_2 R_4}{2 R_1 R_3} + \frac{R_4}{2 R_3} - 3 = 0$$

$$\frac{10K\Omega \times 10K\Omega}{2 \times 5K\Omega \times 5K\Omega} + \frac{10K\Omega}{2 \times 5K\Omega} - 3 = 0$$

$$\frac{100K\Omega}{50K\Omega} + \frac{10K\Omega}{10K\Omega} - 3 = 0$$

$$2 + 1 - 3 = 0$$

$$0 = 0$$

Estructura interna del Amplificador Operacional

Ejemplo :

$$h_{fe} = 100$$

$$R_3 = R_1 = 5K\Omega$$

$$R_4 = R_2 = 10K\Omega$$

$$V_{CC} = V_{EE} = 12V$$

$$V_D = V_{BE} = 0.7V$$

Reemplazamos en las ecuaciones y nos da :

$$I_A = \frac{V_{EE} - 2V_D}{R_1} = \frac{12 - 2 \times 0.7}{5000} = 2.12mA$$

$$I_{C_1} = \frac{I_A}{2} = 1.06mA$$

$$V_{C_1} = V_{CC} - I_{C_1}R_2 = 12 - 1.06 \times 10^{-3} \times 10000 = 1.4V$$

$$V_{E_6} = V_{C_1} + V_D = 1.4 + 0.7 = 2.1V$$

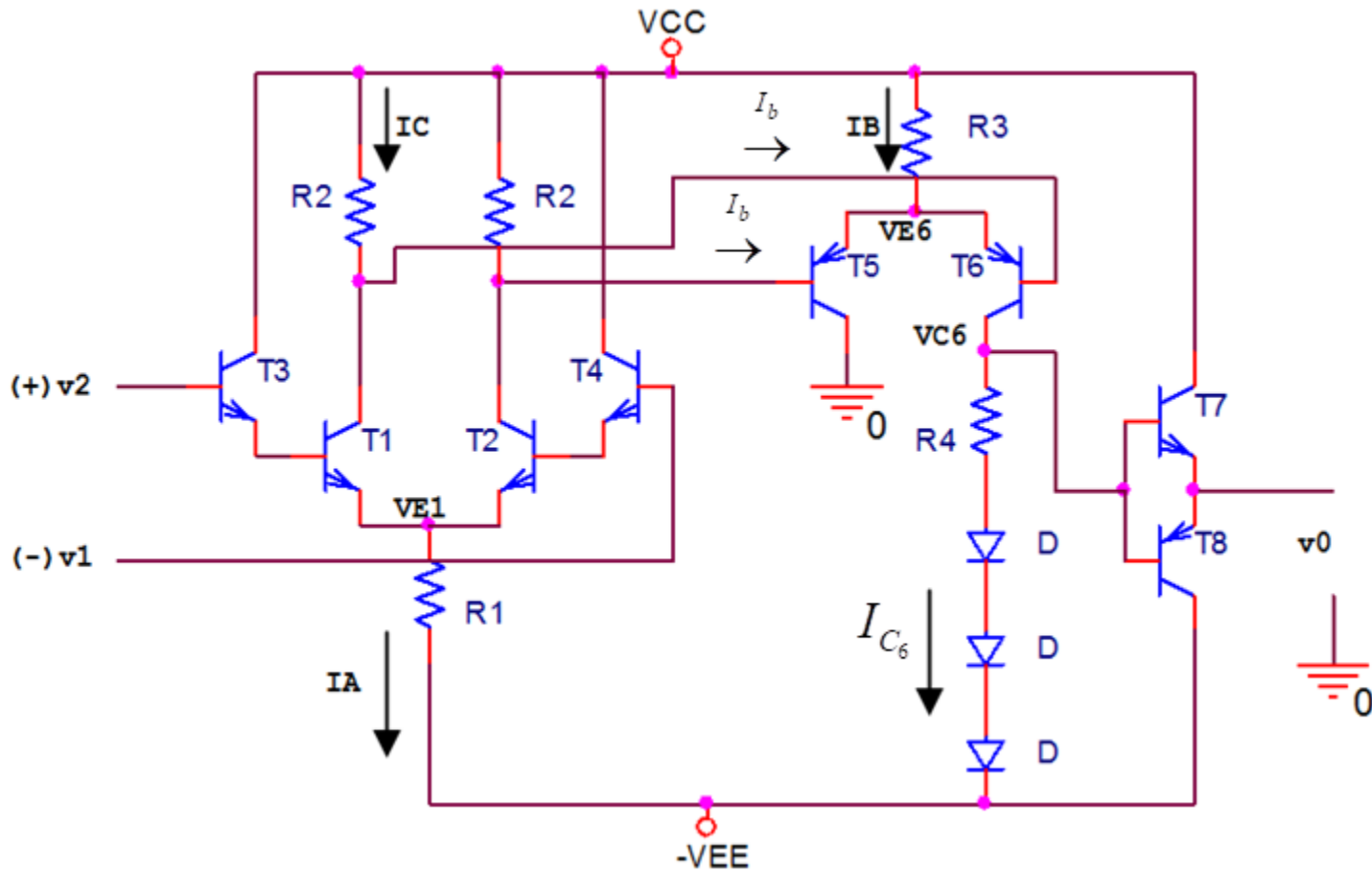
Estructura interna del Amplificador Operacional

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{E_6}}{R_3} = \frac{12 - 2.1}{5000} = 1.98 \text{ mA}$$

$$I_{C_6} = \frac{I_B}{2} = \frac{1.98 \text{ mA}}{2} = 0.99 \text{ mA}$$

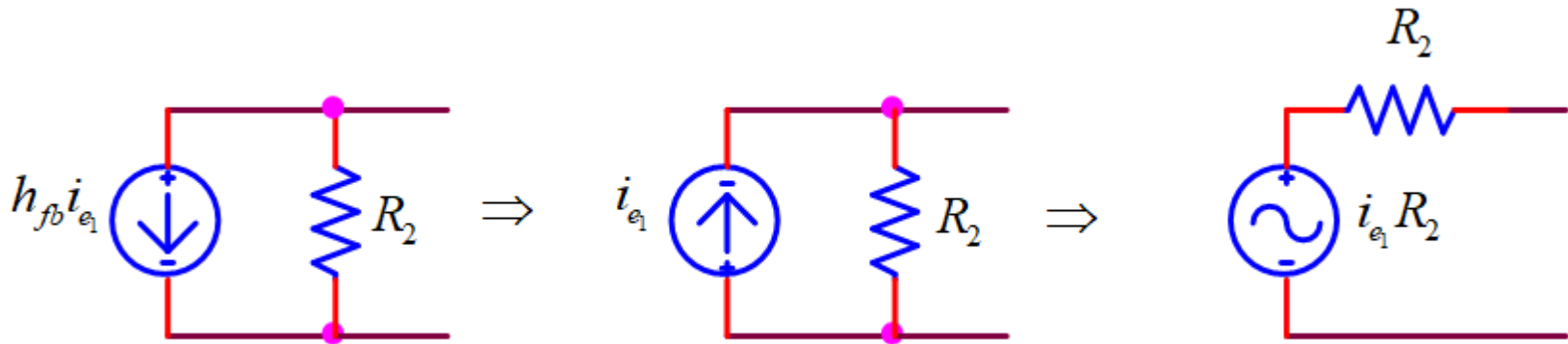
$$V_{C_6} = I_{C_6} R_4 + 3V_D - V_{EE} = 0.99 \times 10^{-3} \times 10000 + 3 \times 0.7 - 12 = 0$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.



Estructura interna del Amplificador Operacional.

Convertimos la fuente de corriente de salida de T_1 en fuente de tensión.

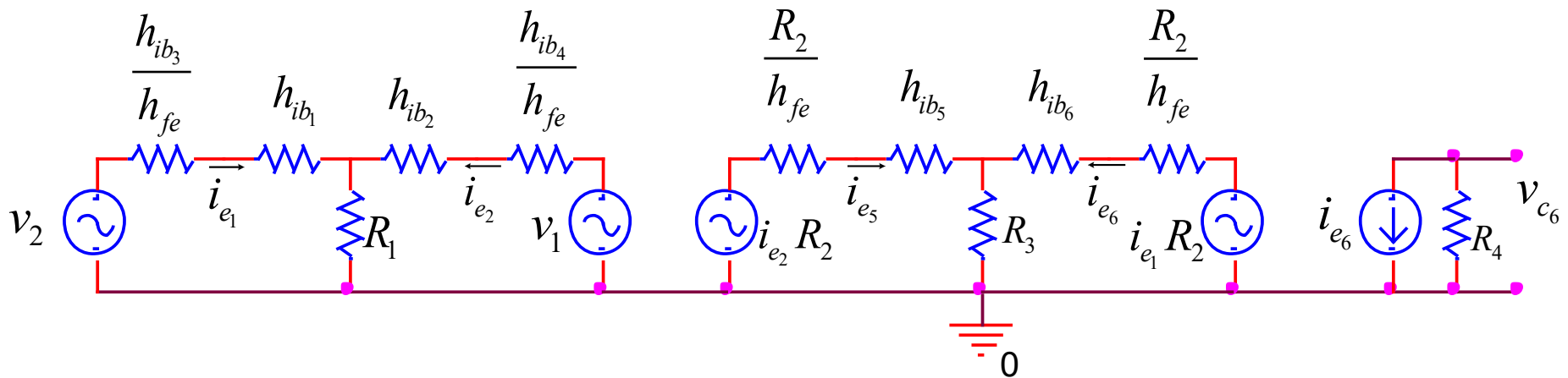


$$h_{fb} = -1$$

Hacemos lo mismo con salida de T_2 .

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Circuito equivalente reflejado en los emisores de $T_1 - T_2$ y $T_5 - T_6$.



Despreciamos en el circuito hibrido las r_d de los diodos debido que son mucho menor que R_4 .

$$h_{ib1} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{CQ1}} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{BQ1} h_{fe}} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{CQ3} h_{fe}} = \frac{h_{ib3}}{h_{fe}}$$

Tambien
$$h_{ib2} = \frac{h_{ib4}}{h_{fe}}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Sabemos que

$$v_c = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (1)$$

$$v_d = v_2 - v_1 \quad (2) \quad \Rightarrow \quad v_1 = v_2 - v_d \quad (3)$$

Reemplazamos 3 en 1

$$v_c = \frac{v_2 - v_d + v_2}{2} = \frac{2v_2 - v_d}{2} = \frac{\cancel{2}v_2}{\cancel{2}} - \frac{v_d}{2} = v_2 - \frac{v_d}{2} \quad \Rightarrow \quad v_2 = v_c + \frac{v_d}{2} \quad (4)$$

Reemplazamos 4 en 3

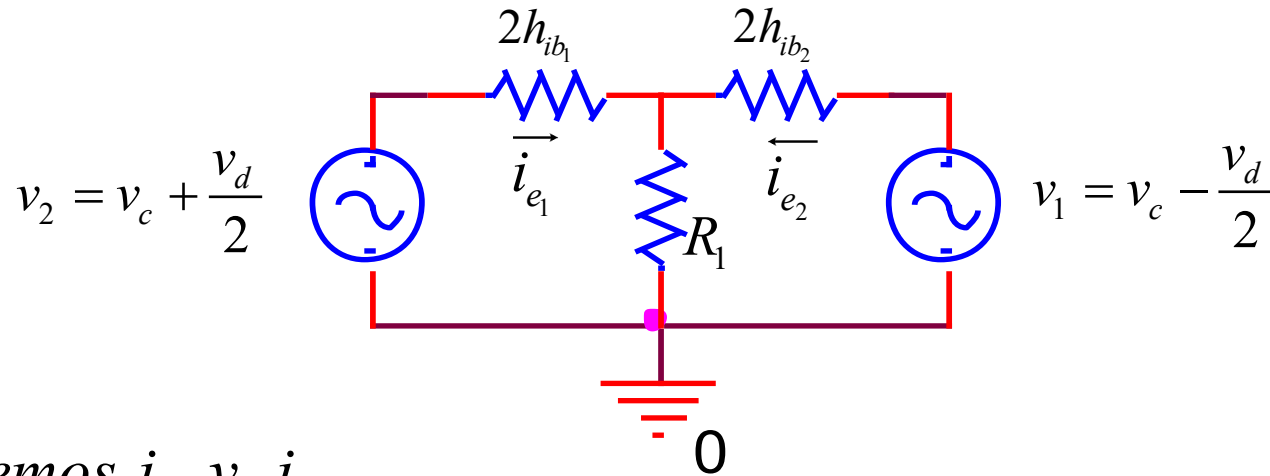
$$v_1 = v_c + \frac{v_d}{2} - v_d = v_c - \frac{v_d}{2}$$

De esta manera obtenemos v_1 y v_2 en funcion de v_c y v_d

$$v_1 = v_c - \frac{v_d}{2} \quad v_2 = v_c + \frac{v_d}{2}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Reemplazamos v_1 y v_2 por los valores obtenidos



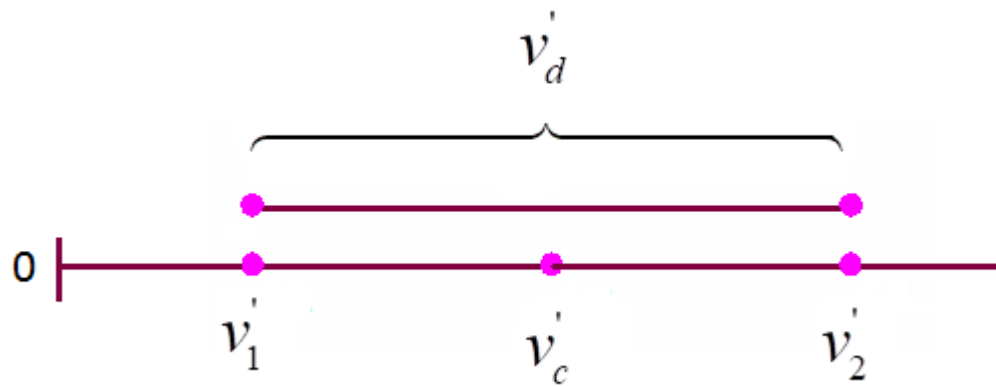
Obtenemos i_{e1} y i_{e2}

$$i_{e1} = \underbrace{\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib1}}}_{\substack{\text{cuando } v_1=v_2 \\ v_d=v_2-v_1=0 \\ v_{R1}=2i_{e1}R_1 \\ v_{R1}=i_{e1}2R_1}} + \frac{v_d}{4h_{ib1}} \quad \substack{\text{cuando } v_1=-v_2 \\ v_c=\frac{v_1+v_2}{2}=0 \\ v_{R1}=\underbrace{(i_{e1}-i_{e2})}_{0}R_1=0}$$

$$i_{e2} = \underbrace{\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib2}}}_{\substack{\text{cuando } v_1=v_2 \\ v_d=v_2-v_1=0 \\ v_{R1}=2i_{e2}R_1 \\ v_{R1}=i_{e2}2R_1}} - \frac{v_d}{4h_{ib2}} \quad \substack{\text{cuando } v_1=-v_2 \\ v_c=\frac{v_1+v_2}{2}=0 \\ v_{R1}=\underbrace{(i_{e1}-i_{e2})}_{0}R_1=0}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Antes de continuar expresamos las fuentes de tensión de entrada de la segunda etapa diferencial, las cuales son las tensiones de salida del primer amplificador diferencial en función de la tensiones a modo común y diferencial.



$$v_1' = v_c' - \frac{v_d'}{2}$$

$$v_2' = v_c' + \frac{v_d'}{2}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Expresamos i_{e_1} e i_{e_2} en función de las componentes a modo común y diferencial.

$$\frac{i_{e_1} + i_{e_2}}{2} = \frac{\left(\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib_1}} + \frac{v_d}{4h_{ib_1}} \right) + \left(\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib_2}} - \frac{v_d}{4h_{ib_2}} \right)}{2}$$

Como $h_{ib_1} = h_{ib_2}$

$$\frac{i_{e_1} + i_{e_2}}{2} = \frac{\cancel{2}v_c}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}} \times \frac{1}{\cancel{2}} = \frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}}$$

$$i_{e_1} - i_{e_2} = \left(\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib_2}} + \frac{v_d}{4h_{ib_2}} \right) - \left(\frac{v_c}{2R_1 + 2h_{ib_1}} - \frac{v_d}{4h_{ib_1}} \right) = \frac{2v_d}{4h_{ib_{1-2}}} = \frac{v_d}{2h_{ib_{1-2}}}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Obtenemos la fuente de tensión de la segunda etapa

$$v'_c = \left(\frac{i_{e_1} + i_{e_2}}{2} \right) R_2 = \frac{R_2 v_c}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}}$$

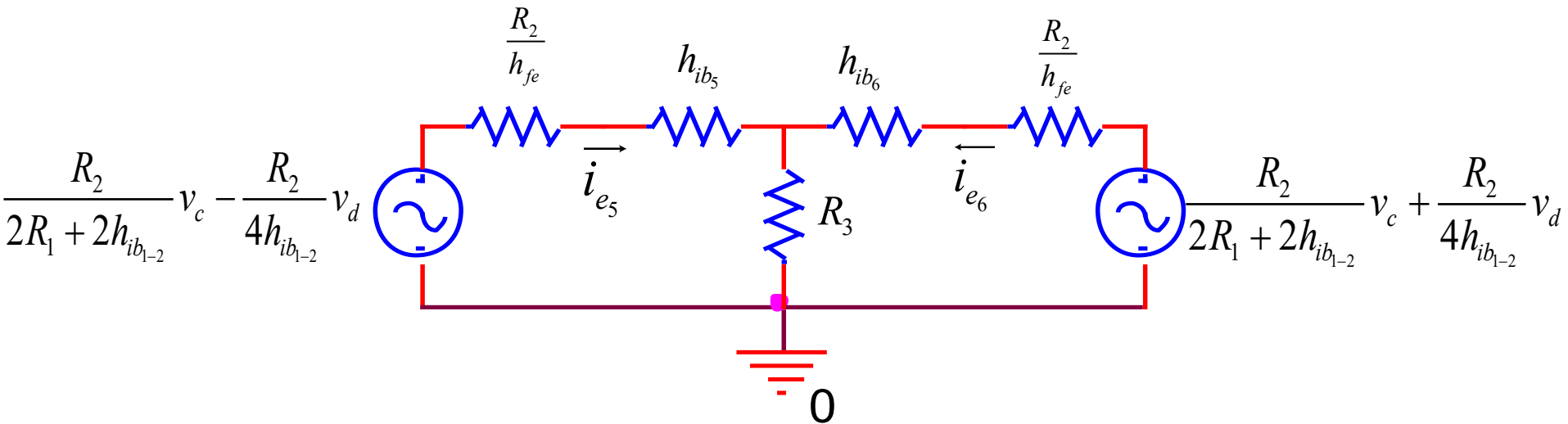
$$v'_d = (i_{e_1} - i_{e_2}) R_2 = \frac{R_2 v_d}{2h_{ib_{1-2}}}$$

$$v'_1 = v'_c - \frac{v'_d}{2} = \frac{R_2}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}} v_c - \frac{R_2}{4h_{ib_{1-2}}} v_d$$

$$v'_2 = v'_c + \frac{v'_d}{2} = \frac{R_2}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}} v_c + \frac{R_2}{4h_{ib_{1-2}}} v_d$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Introducimos lo obtenido en el circuito equivalente de la segunda etapa



$$i_{e_{6c}} = \frac{R_2}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}} v_c \times \frac{1}{2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}}}$$

$$i_{e_{6d}} = \frac{R_2}{4h_{ib_{1-2}}} v_d \times \frac{1}{h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}}}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Sumamos ambas componentes :

$$i_{e_6} = i_{e_{6c}} + i_{e_{6d}} = \frac{R_2 v_c}{2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}} \times \frac{1}{2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}}} + \frac{R_2 v_d}{4h_{ib_{1-2}}} \times \frac{1}{h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}}}$$

$$v_o \cong v_{c_6} = i_{e_6} R_4 = \underbrace{\frac{R_2 R_4}{(2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}) \left(2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}}_{A_c} v_c + \underbrace{\frac{R_2 R_4}{4h_{ib_{1-2}} \left(h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}}_{A_d} v_d$$

$$v_o = A_c v_c + A_d v_d$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Obtenemos la Relación de Rechazo a Modo Común.

$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} = \frac{\frac{R_2 R_4}{4h_{ib_{1-2}} \left(h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}}{\frac{R_2 R_4}{(2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}) \left(2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Obtenemos la Relacion de Rechazo a Modo Común.

$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} = \frac{R_2 R_4}{4h_{ib_{1-2}} \left(h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)} \times \frac{\left(2R_1 + 2h_{ib_{1-2}} \right) \left(2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}{R_2 R_4}$$
$$RRMC = \frac{\left(2R_1 + 2h_{ib_{1-2}} \right) \left(2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}{4h_{ib_{1-2}} \left(h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}$$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

$$h_{ib_{1-2}} = \frac{25mV}{I_{C_1}} = \frac{25 \text{ mV}}{1.06 \text{ mA}} = 23.58 \Omega \quad \Rightarrow \quad h_{ie_{1-2}} = h_{fe} \times h_{ib_{1-2}} = 2.358 \text{ K}\Omega$$

$$h_{ib_6} = \frac{25mV}{I_{C_6}} = \frac{25 \text{ mV}}{0.99 \text{ mA}} = 25.25 \Omega$$

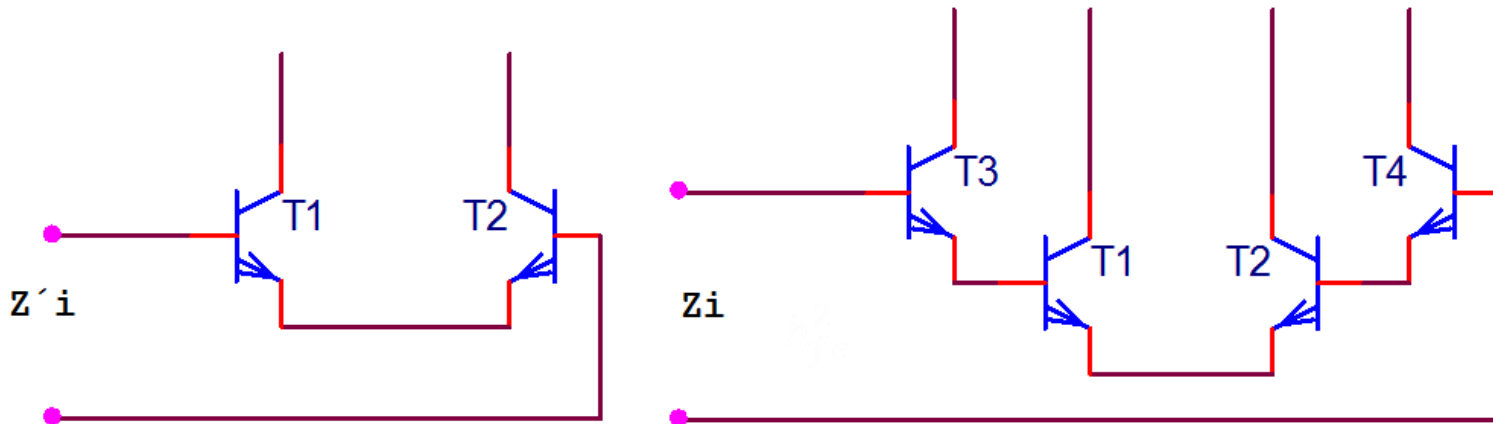
$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} = \frac{(2R_1 + 2h_{ib_{1-2}}) \left(2R_3 + h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}{4h_{ib_{1-2}} \left(h_{ib_6} + \frac{R_2}{h_{fe}} \right)}$$

$$RRMC = \frac{(2 \times 5000 + 2 \times 23.58) \left(2 \times 5000 + 25.25 + \frac{10000}{100} \right)}{4 \times 23.58 \left(25.25 + \frac{10000}{100} \right)} = 8611.3$$

en decibeles, la $RRMC = 20 \log 8611.3 = 78.7 \text{ dB}$

Estructura interna del Amplificador Operacional.

Impedancia de entrada



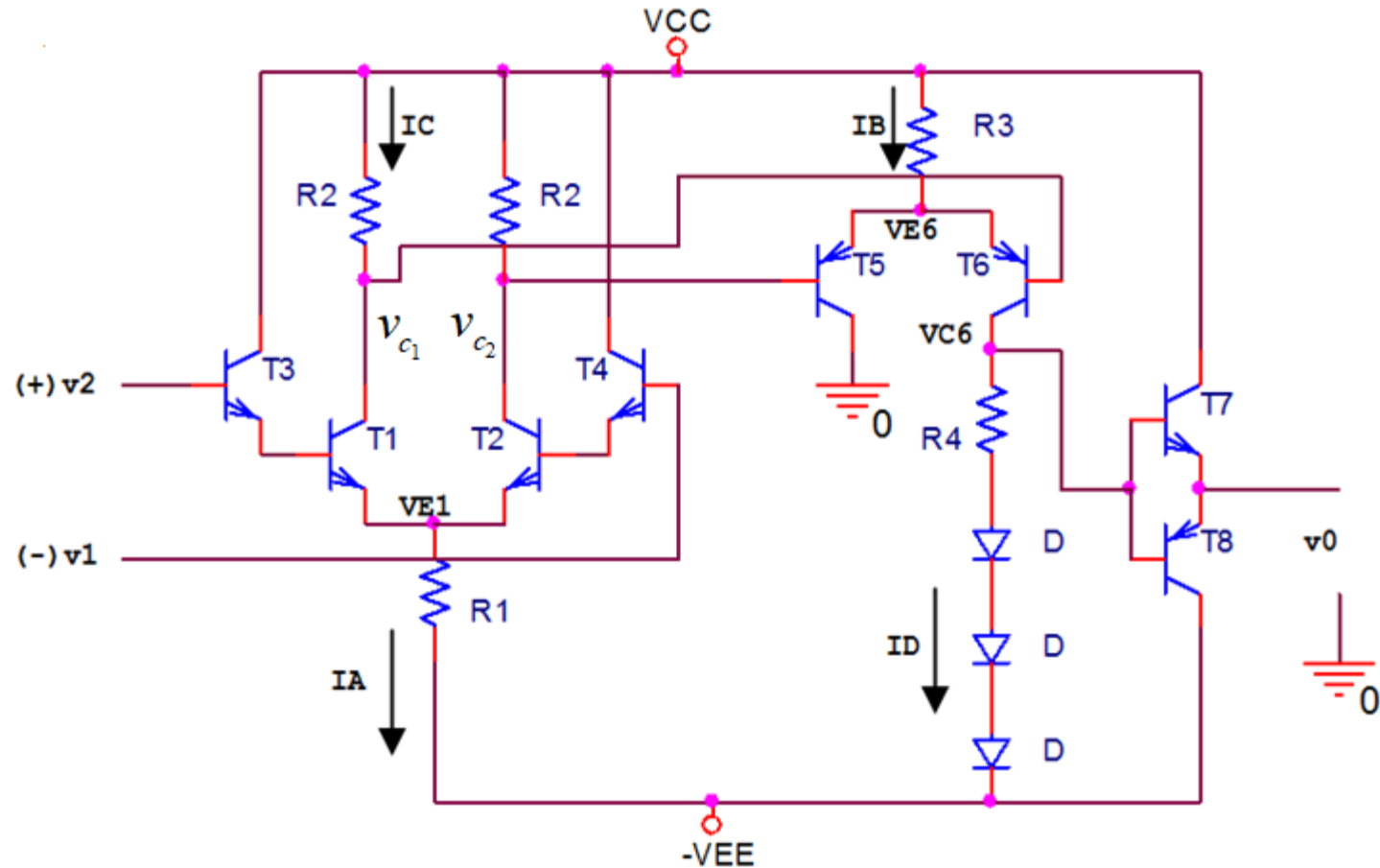
$$Z'_i = h_{ie_1} + h_{ib_2} \times h_{fe} = h_{ie_1} + h_{ie_2} = 2h_{ie_{1-2}} \cong 4.72K$$

$$Z_i = h_{ie_3} + h_{ie_1} \times h_{fe} + h_{ib_2} \times h_{fe}^2 + \frac{h_{ib_4}}{h_{fe}} \times h_{fe}^2 = h_{ie_3} + h_{ie_1} \times h_{fe} + h_{ie_2} \times h_{fe} + h_{ie_4}$$

$$Z_i = 2h_{ie_{3-4}} + 2h_{ie_{1-2}} h_{fe} = 4h_{ie_{3-4}} = 4h_{ie_{1-2}} h_{fe} = 4 \times 2.358 K\Omega \times 100 = 943.2 K\Omega$$

Con el par darlington se logra aumentar 200 veces la impedancia de entrada

Estructura interna del Amplificador Operacional.

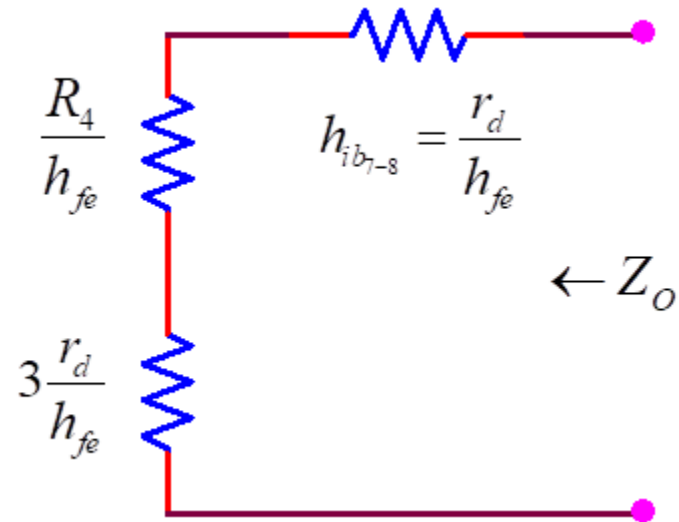


Estructura interna del Amplificador Operacional.

Impedancia de salida.

r_d : Impedancia dinamica del diodo.

Equivalente al h_{ie} de los BJT.



$$Z_o = h_{ib_{7-8}} + \frac{R_4}{h_{fe}} + 3\frac{r_d}{h_{fe}} = \frac{r_d}{h_{fe}} + \frac{R_4}{h_{fe}} + 3\frac{r_d}{h_{fe}} = \frac{R_4}{h_{fe}} + 4\frac{r_d}{h_{fe}} \cong \frac{R_4}{h_{fe}} = \frac{10K}{100} = 100\Omega$$

*La impedancia de salida de los operacionales
esta comprendida entre 80 y 200 Ω .*

Bibliografía

- **Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados,**
- Donald L. Schilling-Charles Belove.
- **Dispositivos Electrónicos,**
- Thomas L. Floyd.
- **Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos,**
- Robert L. Boylestad-Louis Nashelsky.
- **1100 Problemas de Electrónica Resueltos.**
- Ing Alberto Muhana