Amplificadores Operacionales

Un Amplificador Operacional (AO) es un amplificador modular de multietapas con una entrada diferencial que se aproxima mucho en sus características a un " amplificador ideal" . Las propiedades asociadas con el amplificador ideal son:

- Ganancia infinita de voltaje ($A_v \rightarrow \infty$)
- Impedancia de entrada infinita ($Z_{in} \rightarrow \infty$)
- Impedancia de salida cero ($Z_{out} \rightarrow 0$)
- $v_0 = 0$ cuando $v_a = v_b$
- Ancho de banda infinito (no hay atraso de la señal a través del amplificador)

En la práctica, ninguna de estas propiedades puede lograrse, pero ellas son bastante aproximadas.

En la Figura 1 se muestra la representación de un AO indicando los terminales externos que normalmente presenta.

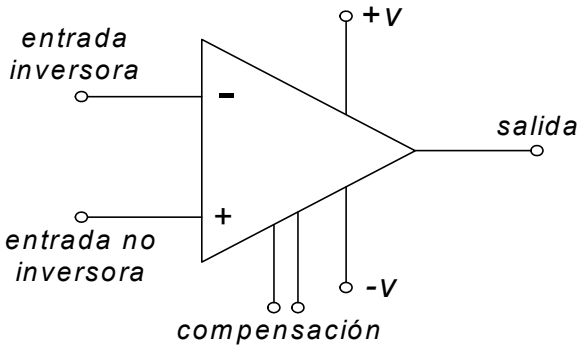

Figura 1 - Terminales de un amplificador operacional

En esta figura $+V$ y $-V$ son las marcas de los terminales para la fuente de potencia. Los terminales de compensación de frecuencia se usan para prevenir oscilaciones del circuito del AO.

El nombre de entrada inversora surge porque si la entrada no inversora se pone a tierra y si se aplica una señal a la entrada inversora, la salida estará desfasada 180^o con respecto a la entrada.

1. Seguidor de Voltaje

En la figura 2 se muestra un AO que con la salida realimentada directamente a la entrada inversora constituye lo que se denomina un seguidor de voltaje (la salida es igual a la entrada).

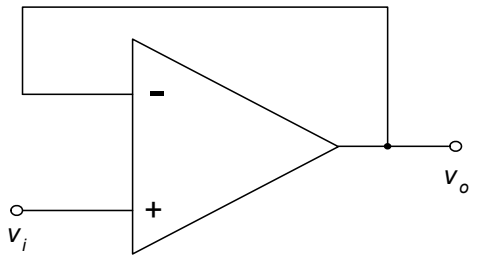

Figura 2 - Seguidor de Voltaje

Esto se demuestra aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$v_o = A_v \left(v_i - v_o \right) \tag{1}$$

Se ve que

$$v_i = v_o \left(1 + \frac{1}{A_v} \right) \tag{2}$$

Como $A_v \rightarrow \infty$, entonces

$$v_o \approx v_i \tag{3}$$

El único camino a tierra para el voltaje de entrada es a través de la alta resistencia de entrada del amplificador, de modo que el seguidor de voltaje hace una buena etapa de aislamiento entre la fuente de voltaje y la carga. Una de las aplicaciones de esta configuración es para aislar la carga de los potenciometros usados como divisores de voltaje, ya que esto permite que se comportan linealmente.

2. Comparador de Voltaje

En la figura 3 se muestra un AO con señales de voltaje aplicadas en las entradas inversora y no inversora, en una configuración de lazo abierto.

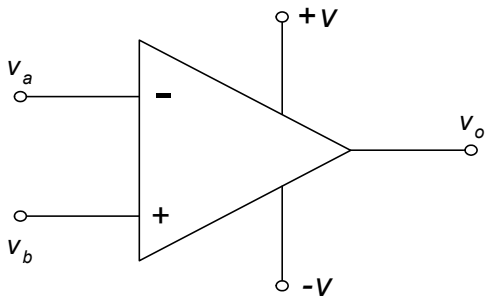

Figura 3 - Comparador de Voltaje

En este caso, el AO se satura debido a la alta ganancia A_v y la salida v_o será

$$v_o = \begin{cases} +v \text{ si } v_b > v_a \\ -v \text{ si } v_b < v_a \end{cases} \tag{4}$$

Una aplicación de esta configuración es el diseño de controladores de dos posiciones.

3. Amplificador no inversor

En la figura 3 se muestra

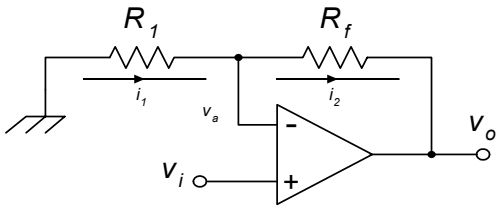

Figura 4 - Amplificador no inversor

La configuración no inversora en la cual la ganancia de voltaje de circuito puede fijarse dentro de ciertos límites con los resistores R_1 y R_f.

Aplicando las propiedades de los AO:

$$v_o = A_v \left(v_i - v_a \right) \tag{5}$$

Por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_i$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_1 = i_2 \tag{6}$$

$$\frac{v_a - 0}{R_1} = \frac{v_o - v_a}{R_f} \tag{7}$$

$$v_o = \frac{R_f}{R_1} v_a + v_a \tag{8}$$

$$v_o = \left(\frac{R_f + R_1}{R_1} \right) v_i \tag{9}$$

4. Amplificador Inversor

Conectado v in a la entrada inversora se obtiene un AO inversor como se muestra en la figura 4.

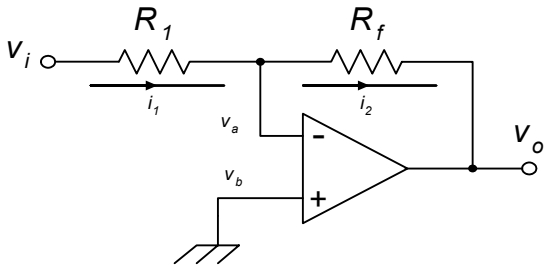

Figura 5 - Amplificador inversor

Aplicando las propiedades de los AO:

$$v_o = A_v \left(v_b - v_a \right) \tag{10}$$

Por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b = 0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_1 = i_2 \tag{11}$$

$$\frac{v_a - v_i}{R_1} = \frac{v_o - v_a}{R_f} \tag{12}$$

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} v_i \tag{13}$$

5. Amplificador con Entrada Diferencial

Para considerar este montaje considérese la figura 5.

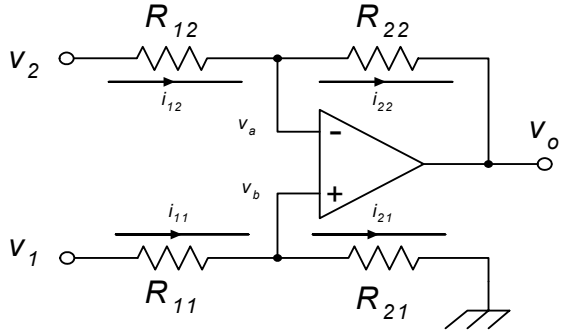

Figura 6 - Amplificador con entrada diferencial

Aplicando las propiedades de los AO: $v_o = A_v (v_b - v_a)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_{11} = i_{21} \tag{14}$$

$$\frac{v_b - v_1}{R_{11}} = \frac{0 - v_b}{R_{21}} \tag{15}$$

$$v_b \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{21}} \right) = \frac{v_1}{R_{11}} \tag{16}$$

$$v_b \left(\frac{R_{11} + R_{21}}{R_{11} R_{21}} \right) = \frac{v_1}{R_{11}} \tag{17}$$

$$v_b = \frac{R_{21} v_1}{R_{11} + R_{21}} \tag{18}$$

$$i_{12} = i_{22} \tag{19}$$

$$\frac{v_a - v_2}{R_{12}} = \frac{v_o - v_a}{R_{22}} \tag{20}$$

$$v_a \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}} \right) = \frac{v_o}{R_{22}} + \frac{v_2}{R_{12}} \tag{21}$$

$$v_a\left(\frac{R_{12}+R_{22}}{R_{12}R_{22}}\right)=\frac{v_o}{R_{22}}+\frac{v_2}{R_{12}} \tag{22}$$

$$v_a=\frac{R_{12}v_o}{R_{12}+R_{22}}+\frac{R_{22}v_2}{R_{12}+R_{22}} \tag{23}$$

Igualando las ecuaciones (18) y (23) se tiene:

$$\frac{R_{21}v_1}{R_{11}+R_{21}}=\frac{R_{12}v_o}{R_{12}+R_{22}}+\frac{R_{22}v_2}{R_{12}+R_{22}} \tag{24}$$

$$\frac{R_{12}v_o}{R_{12}+R_{22}}=\frac{R_{21}v_1}{R_{11}+R_{21}}-\frac{R_{22}v_2}{R_{12}+R_{22}} \tag{25}$$

$$v_o=\frac{R_{21}\left(R_{12}+R_{22}\right)}{R_{12}\left(R_{11}+R_{21}\right)}v_1-\frac{R_{22}}{R_{12}}v_2 \tag{26}$$

Si se diseña el circuito de manera que $R_1\equiv R_{11}=R_{12}$ y $R_2\equiv R_{21}=R_{22}$ se tiene:

$$v_o=\frac{R_2}{R_1}\left(v_1-v_2\right) \tag{27}$$

6. Circuito Sumador

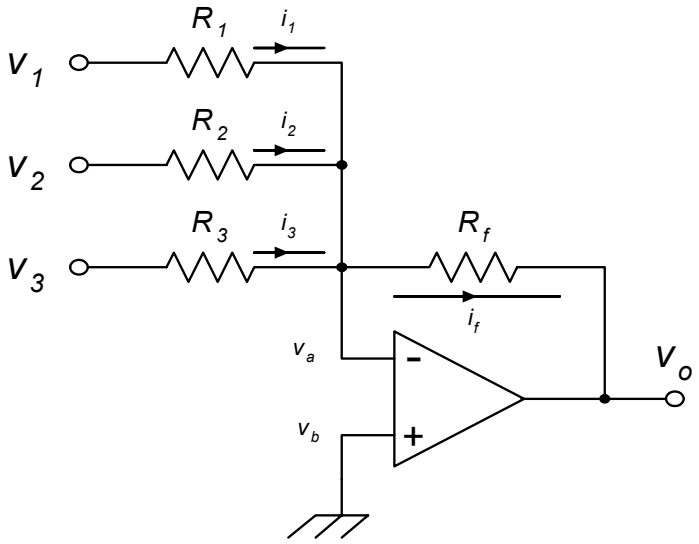

Figura 7 - Circuito sumador

Aplicando al circuito de la figura 7 las propiedades de los AO: $v_o=A_v\left(v_b-v_a\right)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a\approx v_b=0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_1+i_2+i_3=i_f \tag{28}$$

$$\frac{v_a-v_1}{R_1}+\frac{v_a-v_2}{R_2}+\frac{v_a-v_3}{R_3}=\frac{v_o-v_a}{R_f} \tag{29}$$

$$v_o = -R_f \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \right) \tag{30}$$

Si se diseña el circuito de manera que $R_1 = R_2 = R_3$ se tiene:

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} (v_1 + v_2 + v_3) \tag{31}$$

7. Circuito Integrador

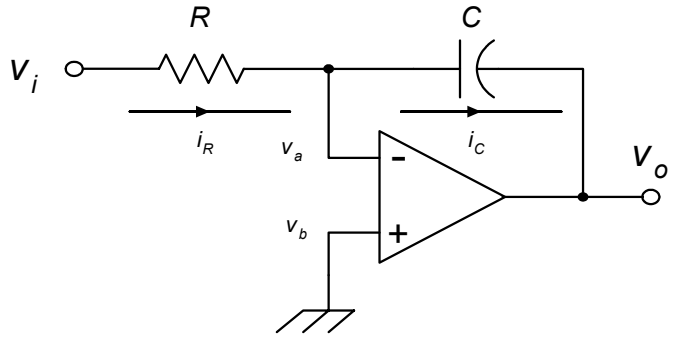

Figura 8 - Circuito integrador

Aplicando al circuito de la figura 8 las propiedades de los AO: $v_o = A_v (v_b - v_a)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b = 0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_R = i_C \tag{32}$$

$$\frac{v_a - v_i}{R} = C \frac{d (v_o - v_a)}{dt} \tag{33}$$

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_i dt \tag{34}$$

8. Circuito Diferenciador

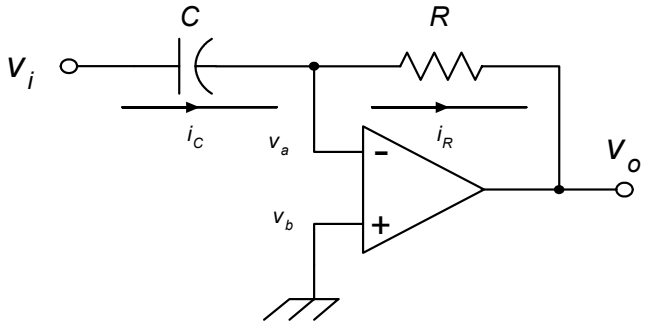

Figura 9 - Circuito diferenciador

Aplicando al circuito de la figura 9 las propiedades de los AO: $v_o = A_v\left(v_b - v_a\right)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b = 0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$i_C = i_R \tag{35}$$

$$C\frac{d\left(v_a - v_i\right)}{dt} = \frac{v_o - v_a}{R} \tag{36}$$

$$v_o = -RC\frac{dv_i}{dt} \tag{37}$$

9. Ejercicios Resueltos

9.1. Ejercicio 1: Resolver el circuito de la Figura 10

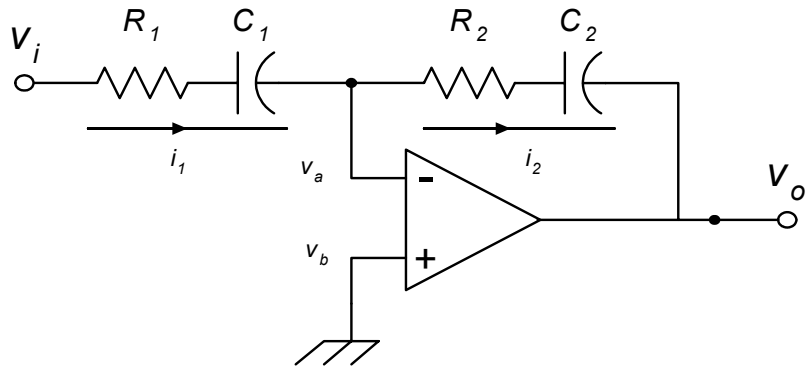

Figura 10 - Ejercicio 1

Para este tipo de ejercicio, se recomienda aplicarle la transformada de Laplace para simplificar la solución, en ese caso se obtiene el circuito de la Figura 11

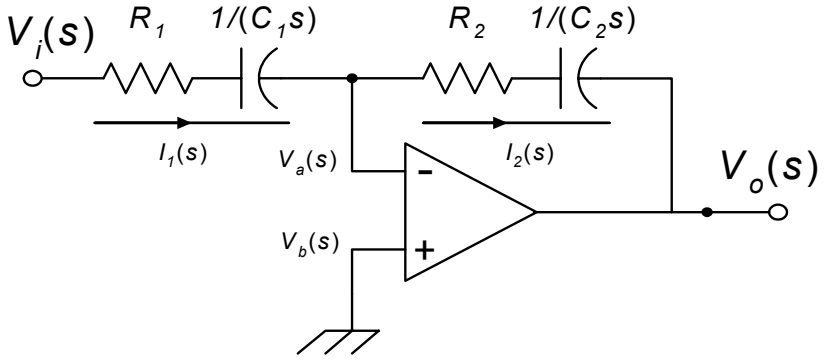

Figura 11 - Circuito equivalente Ejercicio 1

Aplicando al circuito de la figura 11 las propiedades de los AO: $v_o = A_v\left(v_b - v_a\right)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b = 0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$I_1\left(s\right) = I_2\left(s\right) \tag{38}$$

$$\frac{V_a(s) - V_i(s)}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{V_o(s) - V_a(s)}{R_2 + \frac{1}{C_2 s}} \tag{39}$$

$$V_o(s) = -\frac{C_1(R_2 C_2 s + 1)}{C_2(R_1 C_1 s + 1)} V_i(s) \tag{40}$$

9.2. Ejercicio 2: Resolver el circuito de la Figura 12

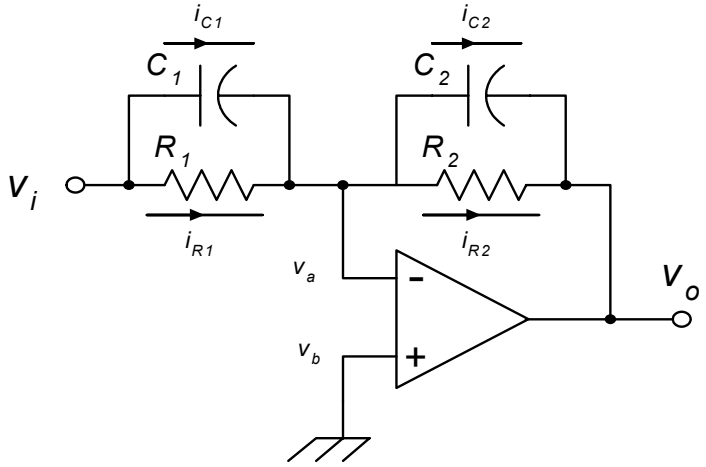

Figura 12 - Ejercicio 2

Para este tipo de ejercicio, se recomienda aplicarle la transformada de Laplace para simplificar la solución, en ese caso se obtiene el circuito de la Figura 13

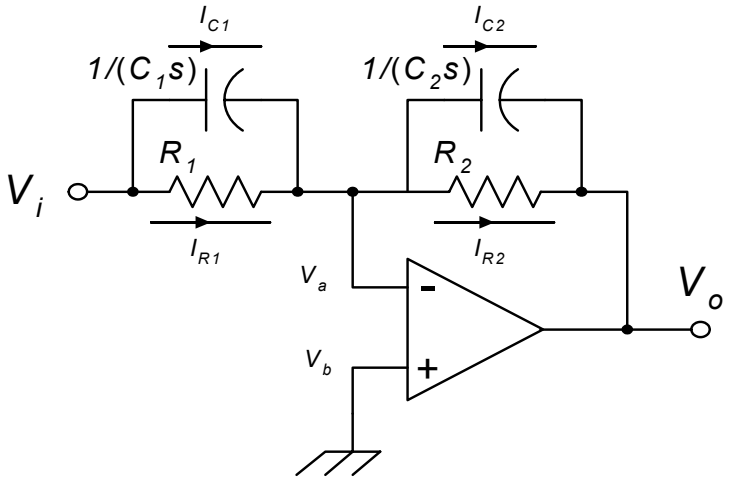

Figura 13 - Circuito equivalente Ejercicio 2

Aplicando al circuito de la figura 13 las propiedades de los AO: $v_o = A_v(v_b - v_a)$, por la alta impedancia de entrada del AO puede decirse que $v_a \approx v_b = 0$ y que no fluye corriente hacia el AO; por lo tanto, aplicando las leyes de Kirchhoff:

$$I_{R1}(s) + I_{C1}(s) = I_{R2}(s) + I_{C2}(s) \tag{41}$$

$$\frac{V_a(s) - V_i(s)}{R_1} + \frac{V_a(s) - V_i(s)}{\frac{1}{C_1 s}} = \frac{V_o(s) - V_a(s)}{R_2} + \frac{V_o(s) - V_a(s)}{\frac{1}{C_2 s}} \tag{42}$$

$$-V_i(s)\left(\frac{1}{R_1} + C_1 s\right) = V_o(s)\left(\frac{1}{R_2} + C_2 s\right) \tag{43}$$

$$-V_i(s)(R_1 C_1 s + 1) = V_o(s)\frac{R_1}{R_2}(R_2 C_2 s + 1) \tag{44}$$

$$V_o(s) = -\frac{R_2(R_1 C_1 s + 1)}{R_1(R_2 C_2 s + 1)} V_i(s) \tag{45}$$