Amplificador no-inversor

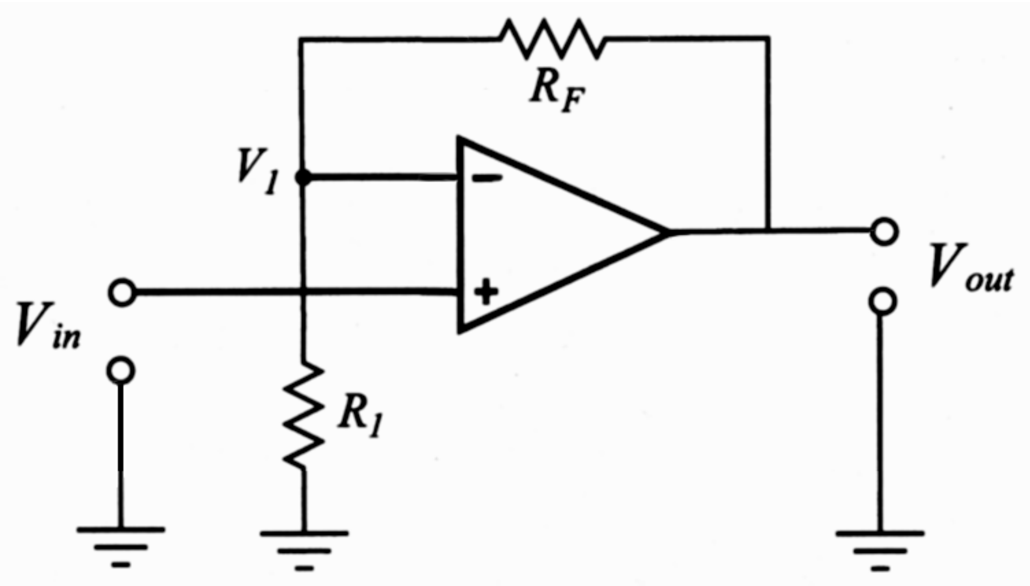

Figura 3. Circuito para un amplificador *no-inversor*. R_F es una resistencia de *feedback* y R_1 una resistencia en la entrada (–).

Método 1. Ver [*Webster*], Cap. 5; la deducción es trivial pues se obtiene de la igualdad $\boldsymbol{V_{in}=V_1}$ (por la Regla 1) y el circuito forma un divisor de voltaje, dando directamente la relación de la ecuación (5).

Método 2. Del [*Blackburn*], Cap. 3. La combinación R_1 y R_F actúa como divisor de voltaje entre la salida y el voltaje en la entrada diferencial inversora (–) V_1:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{out} \tag{2}$$

De la relación fundamental para un amplificador diferencial:

$$V_{out} = A\,(V_+ - V_-) = A\,(V_{in} - V_1) \tag{3}$$

Notar que la regla 1 indica que "$V_{in} = V_1$" con "$A=\infty$"; pero consideremos A finita y hacemos el análisis sin la regla 1, combinando las ecuaciones (2) y (3):

$$V_{out} = A\left[V_{in} - \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{out}\right]$$

o sea:

$$V_{out} = V_{in} \left[\frac{A}{1 + A \dfrac{R_1}{R_1 + R_F}} \right] \tag{4}$$

como $A >> 1$, la última ecuación se puede aproximar a:

$$\boxed{V_{out} \doteq V_{in} \frac{R_1 + R_F}{R_1}} \tag{5}$$

con una ganancia a ***lazo cerrado*** $G = 1 + R_F / R_1$ **independiente de la ganancia a *lazo abierto* A** (recordar las características de un sistema o instrumento con retroalimentación negativa).

Nota: No confundir R_1 (externa al op-amp, conectada a la entrada (–) en la Figura 3) con r_{in} (interna), ni la impedancia de feedback R_F con r_{out} (interna), ni confundir r_{in} o R_i (Webster) o R_1 con la resistencia equivalente de entrada R_{in} de la ecuación (6). Idem R_L con r_{out} (interna) y R_{out} (equivalente).

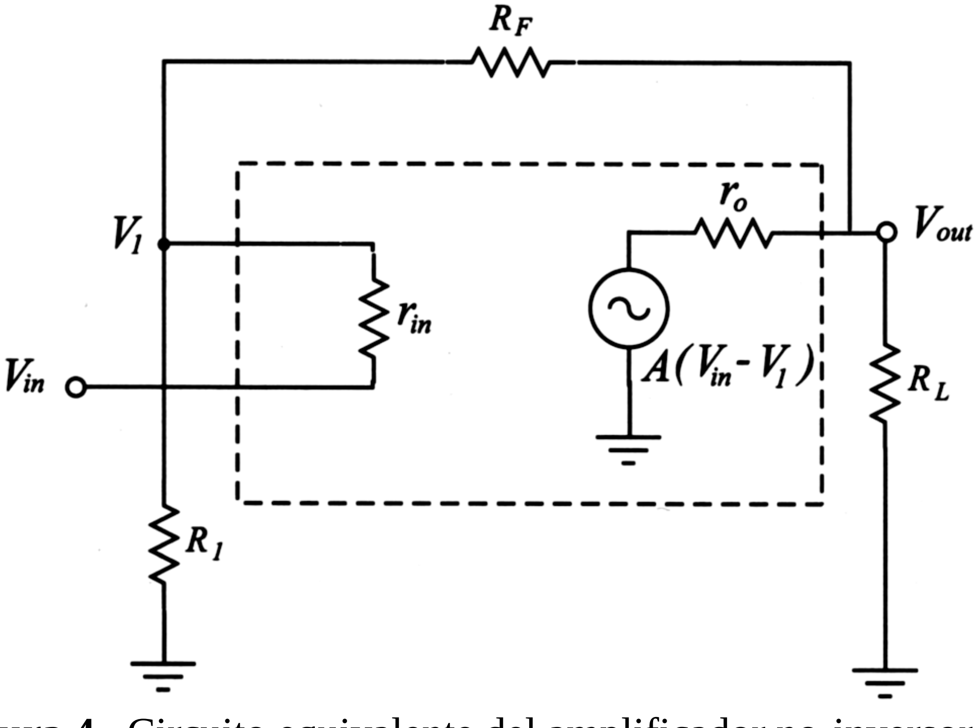

Figura 4. Circuito equivalente del amplificador no-inversor; se agregó a la salida una resistencia de carga R_L.

Amplificador inversor

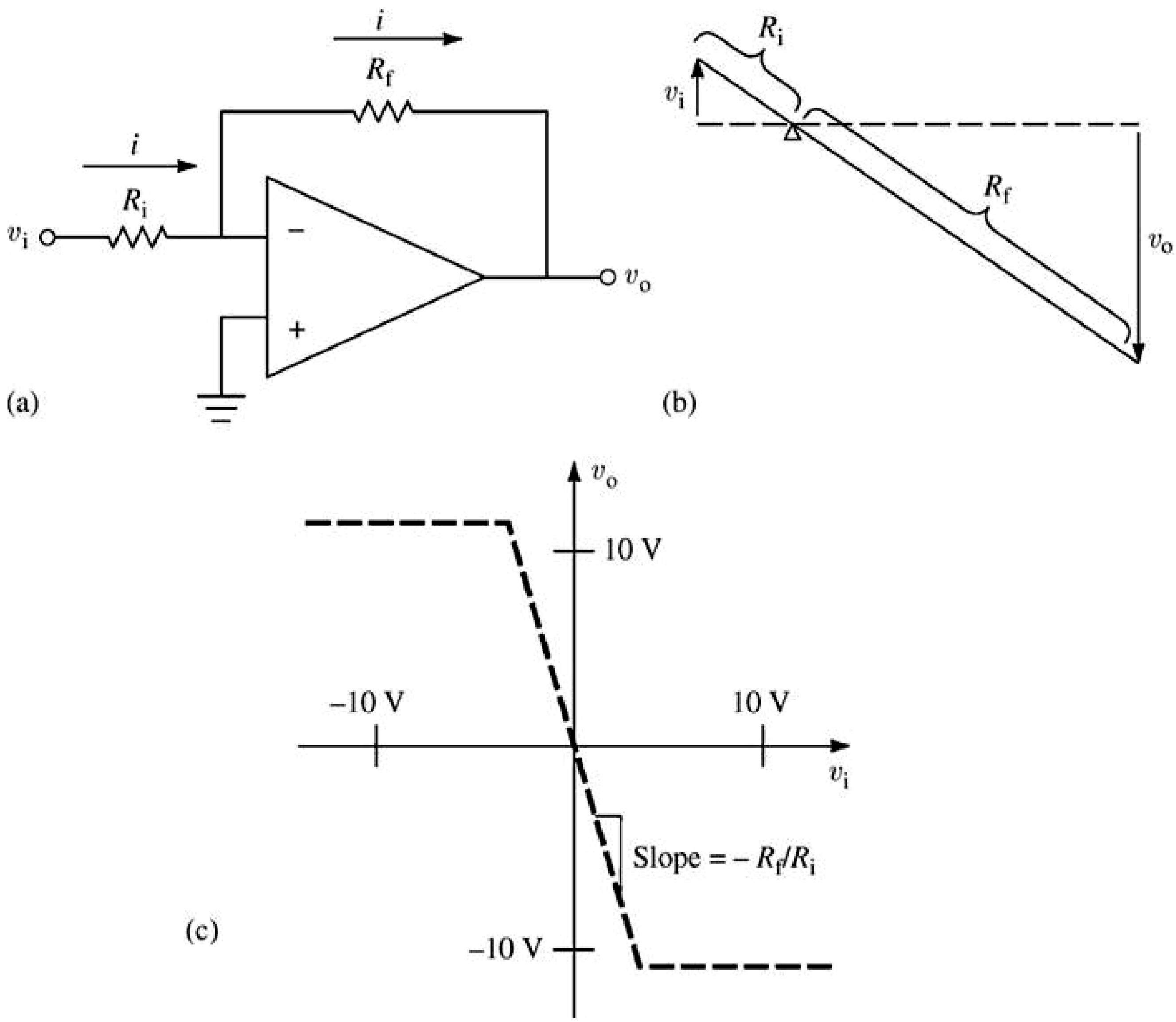

Figura 6. Amplificador *inversor*. La corriente que fluye a través de R_i también fluye a través de la resistencia de feedback R_F (b) Las características de entrada-salida pueden visualizarse como una palanca (el triángulo es el *fulcrum* o punto de apoyo de la palanca), donde la longitud de los brazos es proporcional a cada resistencia. (c) El gráfico entrada-salida muestra una pendiente $-R_F/R_i$ en la porción central; sin embargo la salida satura alrededor de ±13 Volts.

Un amplificador inversor tiene *feedback negativo* (Figuras 5 y 6). Sólo en aplicaciones muy particulares se realimenta la salida V_o a la entrada no-inversora (+). En el inversor, el voltaje en (+) es 0 V (tierra). Por la Regla 1, la entrada negativa (–) debe estar también en

0 V. Esta condición se conoce como *tierra virtual*. Por ley de Ohm, la corriente a través de R_i es $i=V_i\ /R_i$. Por la Regla 2, ninguna corriente puede entrar al op-amp, por lo que i debe fluir a través de R_F produciendo una caída de voltaje a través de R_i igual a iR_i. Como la terminal izquierda de R_F está en 0Vm la terminal derecha debe ser:

$$V_o = -iR_F = -V_i \frac{R_F}{R_i}\ , \text{ o bien:}$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_F}{R_i}} \qquad (10)$$

De modo que el circuito invierte y la ganancia inversora a lazo cerrado (no la A del op-amp) es la razón R_F a R_i.

Sin aplicar las reglas y haciendo el análisis sin las condiciones ideales (ver [*Blackburn*]), es posible demostrar que en realidad la **ganancia a lazo cerrado** es exactamente:

$$\boxed{G = \frac{V_o}{V_i} = -\left(\frac{R_F}{R_i}\right)\left(\frac{1}{1+\frac{1}{A}\left(\frac{R_i+R_F}{R_i}\right)}\right)} \qquad (11)$$

que en el límite cuando $A \to \infty$, da la ecuación (10). Nótese que en (11) nuevamente aparece el *factor de feedback* $\beta = \left(R_i + R_F\right)/R_i$. La resistencia de entrada del circuito inversor está ahora dada por:

$$R_{in} = R_i + \frac{R_F}{A+1} \cong R_i \qquad (12)$$

donde, a diferencia de la ecuación (6), para el amplificador no-inversor, no aparece la impedancia interna de entrada, r_{in}.

Substracción de Voltajes

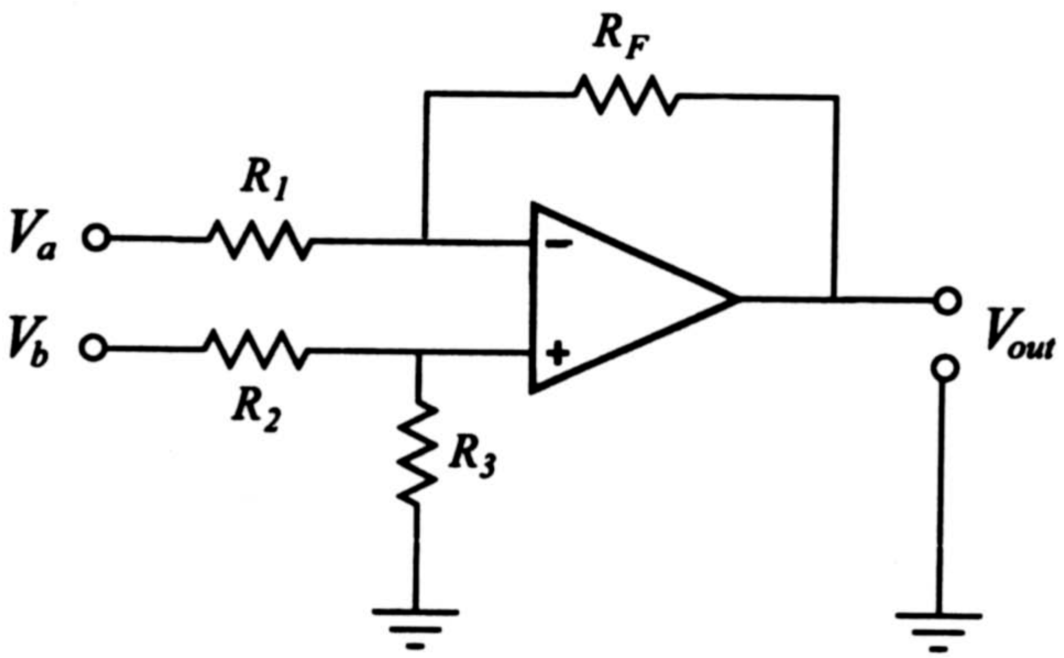

Figura 9. Amplificador de diferencia (substracción).

En la configuración de la Figura 9, la conservación de la corriente en el nodos inversor da:

$$\frac{V_a - V_-}{R_1} = \frac{V_- + V_{out}}{R_F} \tag{15}$$

que se puede escribir como:

$$V_- = \frac{R_1 R_F}{R_1 + R_F}\left[\frac{V_a}{R_1} + \frac{V_{out}}{R_F}\right] \tag{16}$$

y en el nodo no-inversor:

$$\frac{V_b - V_+}{R_2} = \frac{V_+}{R_3} \tag{17}$$

que se puede escribir como:

$$V_+ = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \frac{V_b}{R_2} \tag{18}$$

Aplicando la condición ideal de que el feedback negativo causa que el potencial en la entrada inversora siga al potencial de la entrada no-inversora (ecuación (9)), $V_{-}=V_{+}$, así que igualamos los términos derechos de (14) y (16):

$$\boxed{V_{out} = \left[\frac{1+R_F/R_1}{1+R_2/R_3}\right]V_b - \left[\frac{R_F}{R_1}\right]V_a} \tag{19}$$

El voltaje de salida es la diferencia ponderada de los voltajes de entrada. Escogiendo valores que satisfagan:

$$\frac{R_F}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = k \tag{20}$$

Se obtiene una salida proporcional a la diferencia de las entradas:

$$\boxed{V_{out} = k\left(V_b - V_a\right)} \tag{21}$$

Nótese que en general un op-amp es un “amplificador diferencial”; por ello a configuración que realiza substracción la denominamos “amplificador de diferencia”, pero en el [*Webster*] se usa el término *differential* con ambos significados.

***Fin*§ ►Indice**

Sumador de Voltajes

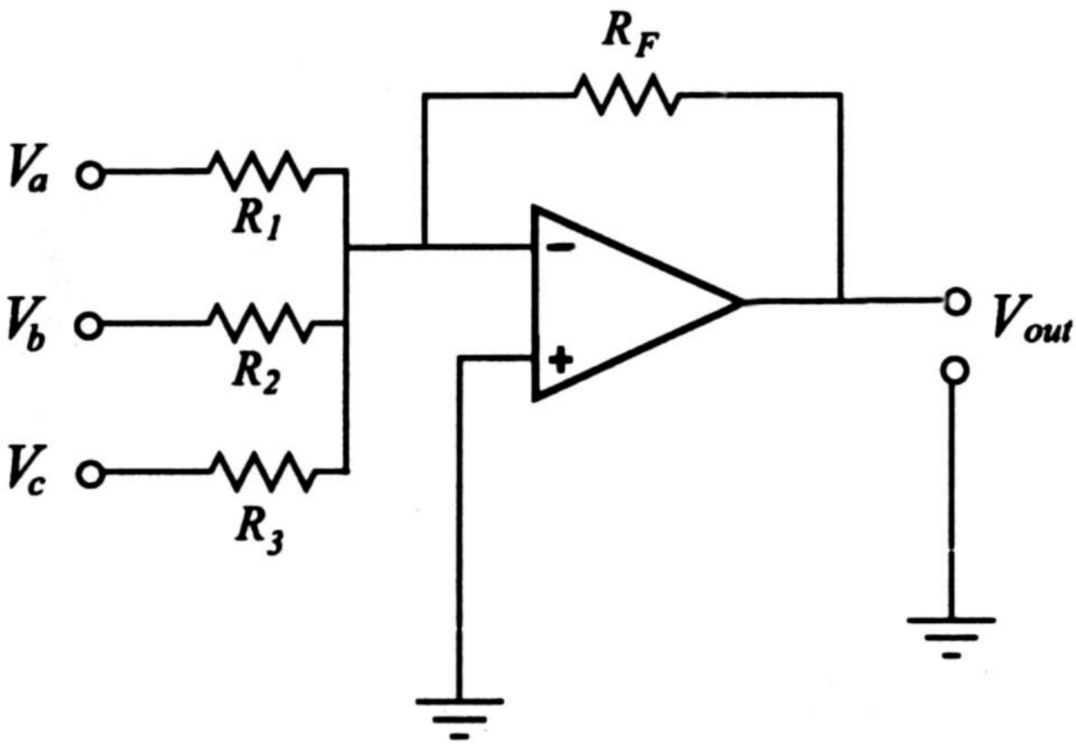

Figura 10. (a) Circuito sumador de V_a, V_b y V_c. El voltaje de salida V_{out} amplifica dicha suma y tiene polaridad inversa; las resistencias de entrada R_1, R_2 y R_3 ponderan la suma para cada voltaje.

Del mismo análisis para el circuito inversor, igualando corrientes que entran y salen del nodo en la entrada inversora, obtenemos:

$$\frac{V_a - V_-}{R_1} + \frac{V_b - V_-}{R_2} + \frac{V_c - V_-}{R_3} = \frac{V_- - V_{out}}{R_F}$$

Invocamos la regla de igualdad de potenciales de entradas inversora y no-inversora: $V_+ = V_-$. Pero en este circuito $V_+ = 0$, de modo que:

$$\frac{V_a}{R_1} + \frac{V_b}{R_2} + \frac{V_c}{R_3} = -\frac{V_{out}}{R_F} \qquad (22)$$

De donde:

$$\boxed{V_{out} = -\left[\left(\frac{R_F}{R_1}\right)V_a + \left(\frac{R_F}{R_2}\right)V_b + \left(\frac{R_F}{R_3}\right)V_c\right]} \qquad (23)$$