

Electrónica Analógica 1

Características de un Amplificador Operacional real

El Amplificador Operacional (A.O.) es un dispositivo con dos terminales de entrada que sensan una diferencia de tensión, y un terminal de salida que se referencia respecto a tierra. Físicamente requiere un mínimo de cinco terminales. Los dos terminales de entrada que se designan como entrada inversora (-) y entrada no inversora (+), otros dos terminales usados para la alimentación de continua y el quinto para la salida. Otros terminales adicionales, usualmente tres, permiten realizar compensaciones de algunos desajustes tales como tensión de offset y compensación de frecuencia. Esquemáticamente se representa en la figura 1. La figura 2 muestra la representación eléctrica equivalente y la figura 3 una disposición típica real según el tipo de encapsulado.

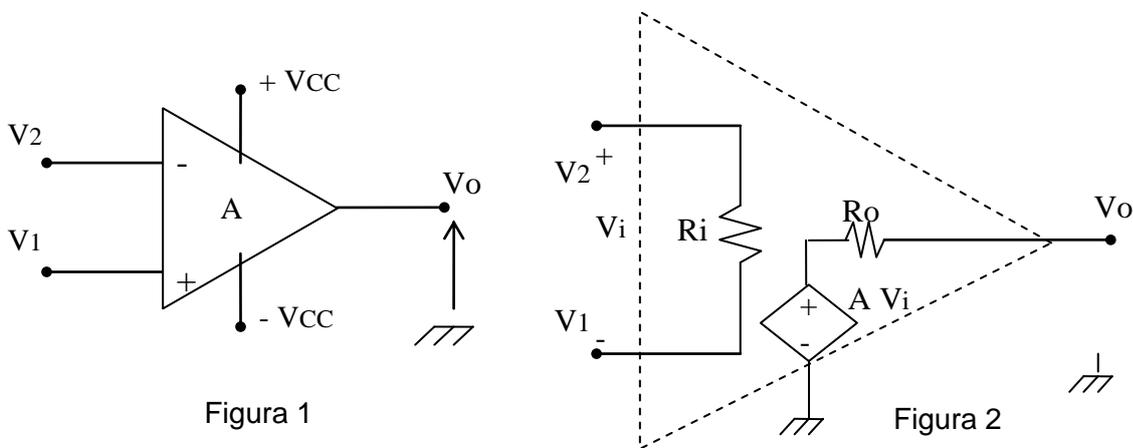


Figura 1

Figura 2

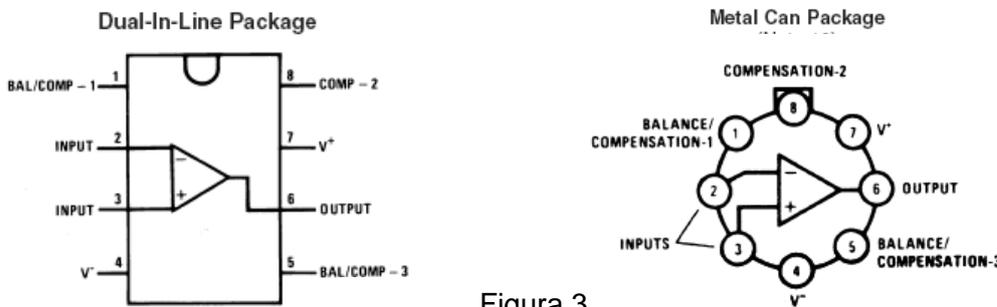


Figura 3

El A.O. ideal se caracteriza por tener $V_i \cong 0$, $A \rightarrow \infty$, $R_i \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow 0$.

Un A.O. es un dispositivo con elevada ganancia de tensión, alta impedancia o resistencia de entrada, baja resistencia de salida y moderado ancho de banda.

Cuando el dispositivo trabaja en la región lineal, la magnitud de la tensión de salida es A veces la diferencia de potencial entre los terminales de entrada.

La relación entre la entrada y la salida de un A.O. puede ser representada gráficamente por la característica de transferencia y matemáticamente a través del circuito equivalente, figura 4

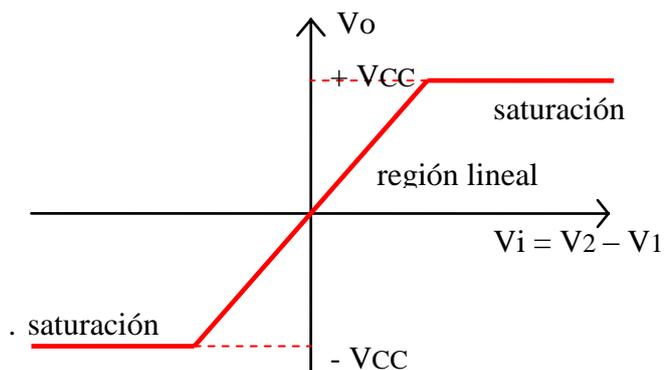


Figura 4

El A. O. utiliza realimentación negativa, a través de un componente que vincula la salida con al entrada inversora. Debido a que la ganancia del A.O. es afectada por los componentes que forman al dispositivo, se producen variaciones por temperatura, condiciones de operación, envejecimiento, etc. Por ejemplo, los transistores bipolares poseen una variación de la tensión de base a emisor con la temperatura del orden de $-2.2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ y variaciones de la ganancia de corriente β que producen variaciones en la ganancia del amplificador. Una configuración de realimentación negativa contribuye a reducir estos efectos. Se mejora la estabilidad, linealidad, se reduce la distorsión, decrece la resistencia de salida y aumenta la resistencia de entrada. Sin embargo, el costo por estas mejoras es la reducción de la ganancia denominada de lazo abierto (A , sin realimentación) respecto a la ganancia con realimentación denominada de lazo cerrado.

Configuración básica de un sistema realimentado

En la figura 5 se representa una configuración básica de un A.O. realimentado donde V_d representa una tensión externa o perturbación en el sistema, por ejemplo un ruido. V_e es la tensión de error, diferencia entre la entrada y la salida del bloque de realimentación. F representa la red de alimentación, formada por componentes discretos pasivos.

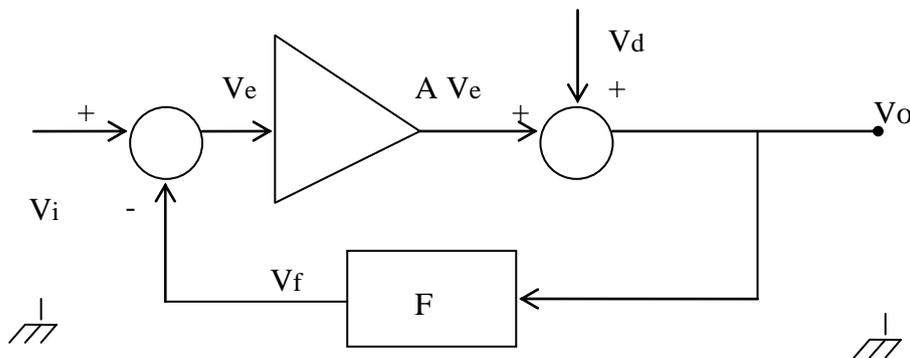


Figura 5

El sistema puede ser representado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V_e &= V_i - V_f \\ V_o &= A V_e + V_d \\ V_f &= F V_o \end{aligned}$$

Operando con las ecuaciones anteriores resulta:

$$V_o = V_i \frac{A}{1 + A F} + \frac{V_d}{1 + A F}$$

$A F$ es la denominada ganancia de lazo. Si $A F \gg 1$ el sistema reduce el efecto de V_d en una cantidad $(1+AF)$ veces. Si $V_d \cong 0$, resulta:

$$V_o = V_i \frac{A}{1 + A F} \cong V_i \frac{A}{A F} \cong \frac{V_i}{F}$$

La ganancia de lazo cerrado es:

$$\frac{V_o}{V_i} \cong \frac{1}{F}$$

De esta forma se desensibiliza la ganancia del amplificador y queda determinada por la red de componentes externos.

Estructura básica de un A.O. Parámetros

La figura 6 muestra las etapas básicas que constituyen un A. O. con transistores bipolares.

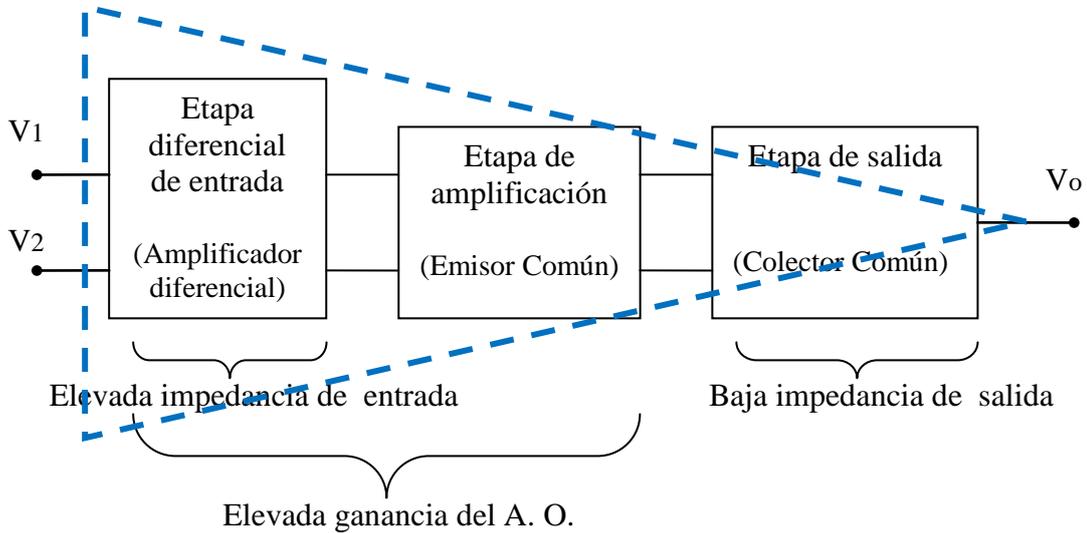


Figura 6

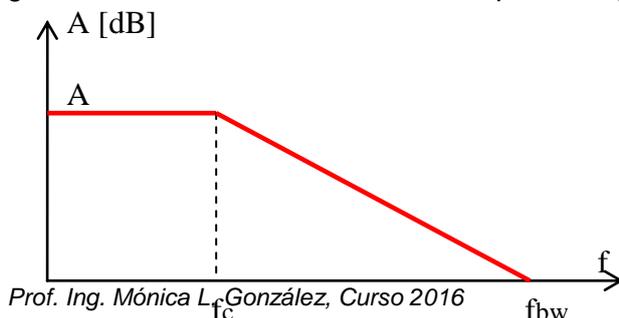
Resistencia de entrada (Ri): es la resistencia medida entre las entradas inversora y no inversora del A. O. Del orden de 2 MΩ o mayor está determinada por la magnitud de la corriente de entrada consumida por el A. O. cuando se aplica una tensión diferencial.

Resistencia de salida (Ro): es la resistencia equivalente de Thevenin medida entre el terminal de salida del A. O. y tierra. Reduce la tensión de salida cuando se conecta una carga RL.

Capacidad de entrada (Ci): es la capacidad equivalente medida en una de las entradas con la otra entrada conectada a tierra. Típicamente Ci ≅ 1.4 pF, limita el tiempo de respuesta del A.O.

Ganancia de tensión diferencial a lazo abierto (A): se define como la relación entre la tensión de salida y la tensión diferencial de entrada A = Vo/Vd. Valor típico 2x10⁵.

Frecuencia para ancho de banda unitario (fbw): La ganancia A es máxima a frecuencias bajas y disminuye por efectos internos. La figura 7 muestra una respuesta en frecuencia típica. Aproximadamente la ganancia se reduce con una pendiente de - 20 dB/década. La ganancia en función de la frecuencia puede expresarse:



$$A(jf) = \frac{A}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

fc es la frecuencia de corte o de 3 dB
Si f >> fc, la ecuación anterior queda:

Figura 7

$$A(jf) \cong \frac{A}{j \frac{f}{f_c}} = \frac{A f_c}{j f}$$

La magnitud de la ganancia se vuelve unitaria a una frecuencia $f_{bw} = A f_c$. La frecuencia f_{bw} se denomina ancho de banda unitario.

Relación de rechazo de modo común

Como el A. O. es un amplificador diferencial, debe amplificar la tensión diferencia aplicada a los terminales de entrada. Cualquier señal no deseada que aparezca al mismo tiempo en ambas entradas no debería ser amplificada. Las tensiones v_1 y v_2 aplicadas a las entradas del A.O. pueden dividirse en dos componentes: una tensión diferencial v_d y una tensión de modo común v_c , definidas como:

$$v_d = v_2 - v_1 \quad \text{y} \quad v_c = (v_2 + v_1)/2$$

Entonces las tensiones de entrada pueden expresarse como:

$$v_2 = v_c + v_d/2$$

$$v_1 = v_c - v_d/2$$

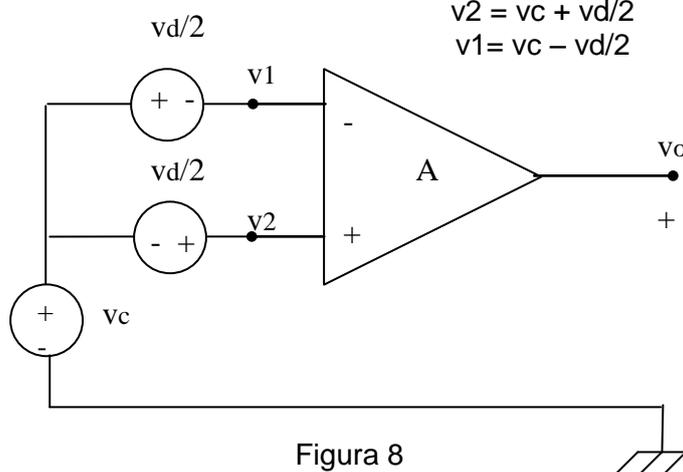


Figura 8

Sea A_1 la ganancia de tensión con una entrada en el terminal inversor y la entrada no inversora conectada a tierra.

Sea A_2 la ganancia de tensión con una entrada en el terminal no inversor con la entrada inversora conectada a tierra.

La tensión de salida v_o puede obtenerse aplicando teorema de superposición:

$$v_o = A_1 v_1 + A_2 v_2$$

$$v_o = A(v_c - v_d/2) + A_2(v_c + v_d/2)$$

$$v_o = \left(\frac{A_2 - A_1}{2} \right) v_d + (A_1 + A_2) v_c$$

$$v_o = A_d v_d + A_c v_c$$

A_d : ganancia de tensión diferencial

A_c : ganancia de tensión en modo común

$$v_o = A_d \left(v_d + \frac{A_c}{A_d} v_c \right)$$

$A_d > A_c$, ya que A_1 es negativo. Si A_d se hace mucho mayor que A_c entonces:

$$v_o \cong A_d v_d$$

La tensión de salida será casi independiente de la señal de modo común v_c .

La habilidad de un A.O. para rechazar la señal de modo común se define por un parámetro de desempeño denominado relación de rechazo de modo común (CMRR), que se define como la relación (magnitud) de las ganancias A_d y A_c .

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

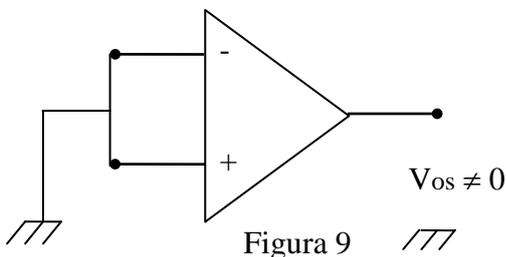
$$CMRR_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| [dB]$$

Idealmente $CMRR \rightarrow \infty$. Un buen A.O. tiene un valor de $CMRR \cong 100 \text{ dB}$

El amplificador Operacional real

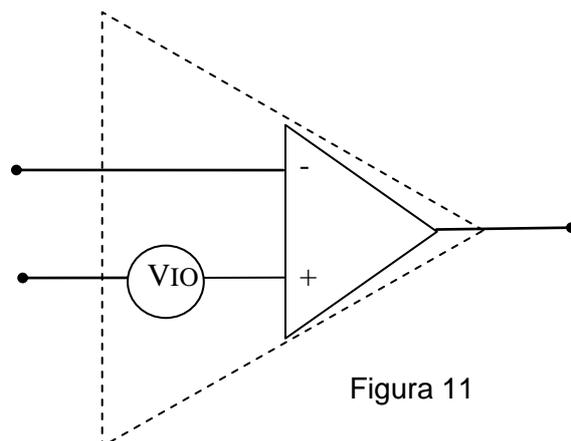
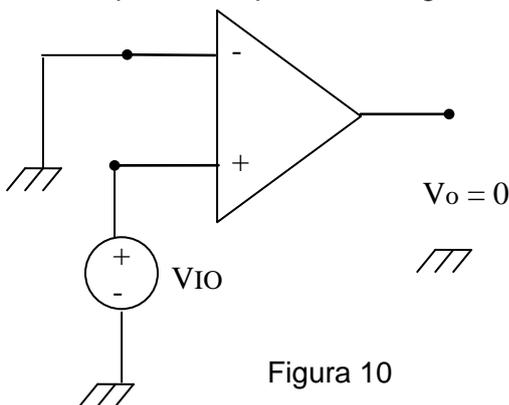
Tensión de offset

Los desbalances o asimetrías en los circuitos que componen las etapas del A.O., básicamente la etapa diferencial de entrada, pueden producir una tensión de salida no nula cuando se aplica una tensión diferencial nula. Si los dos terminales de entrada del A.O. se unen y conectan a tierra, se mide una tensión no nula aunque pequeña en la salida, figura 9.

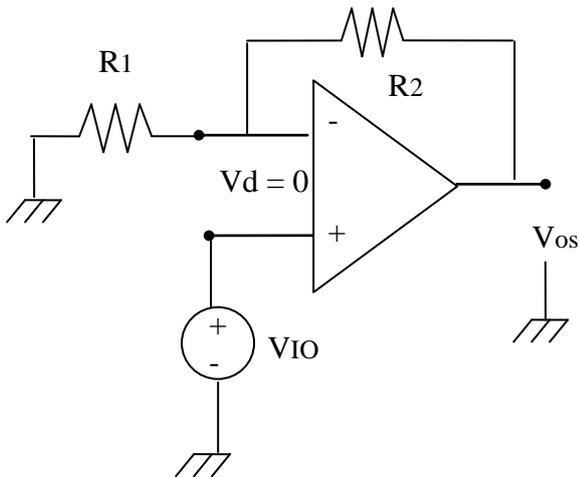


La tensión de offset de continua de salida (VOS) es la tensión de salida a lazo abierto que se mide cuando la tensión diferencial de entrada es nula.

La salida del A. O. regresará al valor ideal (0 V) si se conecta a la entrada una fuente de tensión continua de polaridad y magnitud apropiadas. Se define la tensión de offset de continua a la entrada como la tensión de entrada diferencial (VIO) que debe aplicarse en el A. O. a lazo abierto para producir una tensión de salida nula, figura 10. Se modela como una fuente continua en serie con la entrada no inversora de un A.O. libre de offset, figura 11. VIO puede ser positiva o negativa.



Ejemplo: A.O. inversor



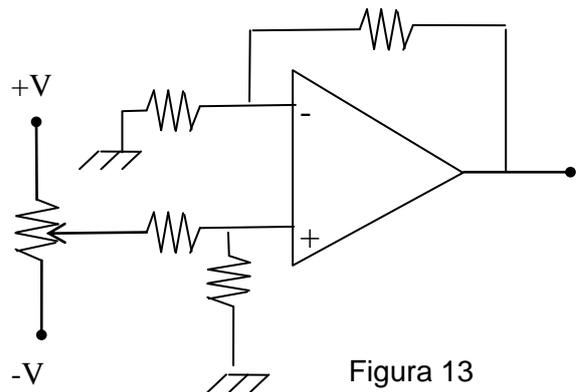
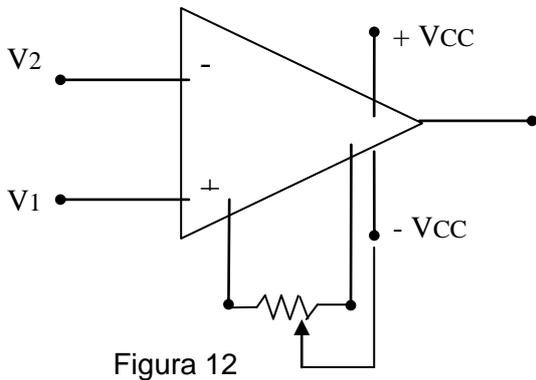
$R_2 = 100\text{ K}\Omega$
 $R_1 = 10\text{ K}\Omega$
 $V_{io} = \pm 6\text{ mV}$

$$V_{os} = V_{io} (1 + R_2/R_1)$$

$V_{os} = \pm 6\text{ mV} (1 + 100/10) = \pm 66\text{ mV}$
 que aparecen a la salida sin ninguna señal externa aplicada.

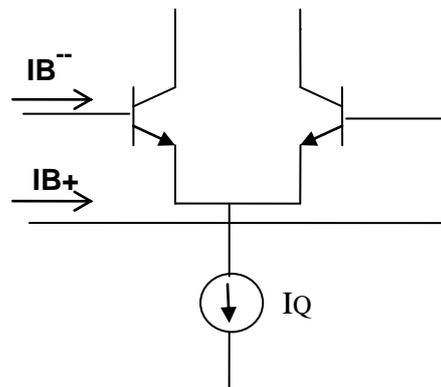
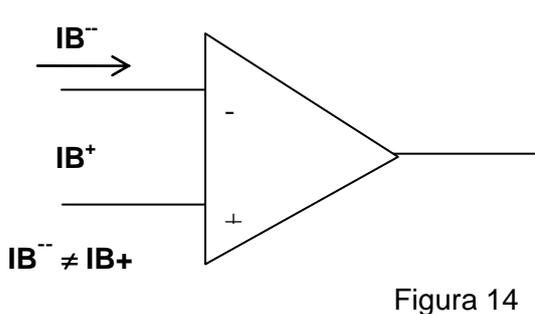
Compensación de la tensión de offset

Los A.O. suelen tener un par de terminales de ajuste de offset. Entre estos terminales se coloca un potenciómetro externo. Al variar el contacto del potenciómetro la tensión de offset de salida puede ser ajustada a cero dentro de cierto intervalo, figura 12. De lo contrario, se puede usar una red externa de compensación de tensión de offset, figura 13.



Corrientes de polarización de entrada

Para un A. O. ideal las corrientes de polarización de entrada son nulas. Para un A. O. real no se cumple esta condición. Por ejemplo, para una A. O. bipolar la corriente de polarización está en el orden de los nA (30nA -80 nA típico), figura 14



Se especifican dos valores:

- **Corriente de polarización de entrada** (promedio de las dos corrientes de entrada)

$$I_{IB} = \frac{I_{B-} + I_{B+}}{2}$$

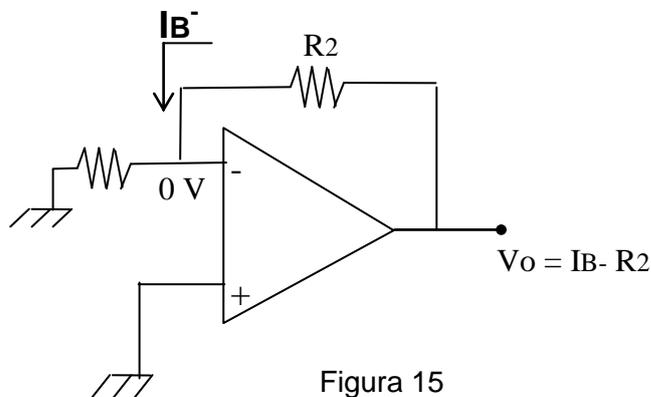
- **Corriente de offset de entrada** (diferencia de las dos corrientes de entrada)

$$I_{IO} = |I_{B-} - I_{B+}|$$

Valores típicos: $I_{IB} = 100 \text{ nA}$, $I_{IO} = 10 \text{ nA}$

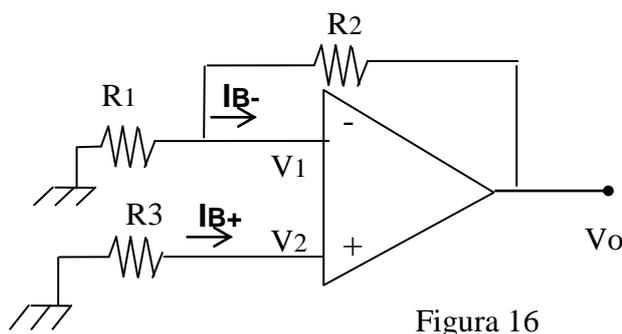
Efecto de la corriente de polarización de entrada

En el siguiente circuito se tiene $I_{B-} = 5 \mu\text{A}$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ entonces se produce una tensión de salida de $V_o = 0.5 \text{ V}$, sin tensión aplicada a la entrada, figura 15.



Compensación de la corriente de polarización

Se coloca un resistor R_3 de valor adecuado como se muestra en al figura 16. Para calcular el valor de R_3 se puede aplicar el principio de superposición:



1- $I_{B+} = 0$, $V_2 = V_1 = 0$, entonces $V_{o1} = I_{B-} R_2$

2- $I_{B-} = 0$, $V_2 = -I_{B+} R_3 = V_1$ (por tierra virtual),
 $V_{o2} = V_1 (1 + R_2/R_1) = -I_{B+} R_3 (1 + R_2/R_1)$

3- $V_{oT} = V_{o1} + V_{o2} = I_{B-} R_2 - I_{B+} R_3 (1 + R_2/R_1)$

Para anular el efecto de la corrientes de polarización $V_{oT} = 0$. Considerando $I_{B-} = I_{B+} = I_B$

$$V_{oT} = I_B (R_2 - R_3 (1 + R_2/R_1)) = 0$$

de donde resulta como valor apropiado para R3:

$$R_3 = R_1 // R_2$$

Si las corrientes fueran iguales colocando R3 se eliminaría el efecto. Como las corrientes no son iguales, si definimos: $I_{IO} = I_{B-} - I_{B+}$, resultan:

$$I_{B-} = I_B + I_{IO}/2, \quad I_{B+} = I_B - I_{IO}/2$$

Reemplazando estas corrientes en la expresión de VOT y operando resulta:

$$V_{OT} = I_{IO} R_2$$

El efecto no se anula pero se reduce notablemente, ya que queda dependiendo de la diferencia de las corrientes.

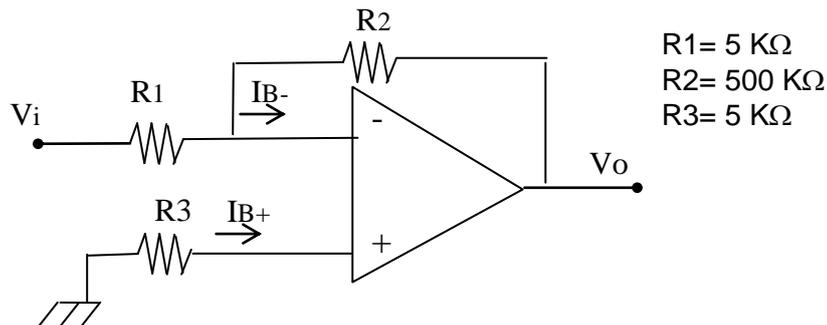
Ejemplo: si $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$, $I_{B-} = 1.1 \text{ }\mu\text{A}$, $I_{B+} = 1 \text{ }\mu\text{A}$

Sin compensar resulta $V_o = I_{B-} R_2 = 110 \text{ mV}$

Colocando $R_3 = 100 \text{ K}\Omega // 10 \text{ K}\Omega = 9.09 \text{ K}\Omega$ resulta $V_o = (I_{B-} - I_{B+}) R_2 = 10 \text{ mV}$

Cálculo del offset total

Si $V_{IO} = 4 \text{ mV}$ e $I_{IO} = 150 \text{ nA}$ en el siguiente circuito:



$$V_o (\text{debido a } V_{IO}) = V_{IO} (1 + 500/5) = 404 \text{ mV}$$

$$V_o (\text{debido a } I_{IO}) = I_{IO} R_2 = 75 \text{ mV}$$

$$V_{oT} = 479 \text{ mV}$$

Velocidad de respuesta

Es un fenómeno que causa distorsión no lineal. Hay una velocidad máxima de cambio a la salida de un A. O. real. A este máximo se lo conoce como velocidad de respuesta del A. O. y se define como:

$$SR = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{\text{máx}} \quad (\text{Slew rate})$$

Suele especificarse en la hoja de datos en $[V/\mu\text{s}]$. Si la señal de entrada aplicada al circuito exige una respuesta de salida más rápida que el valor especificado por el SR, el A. O. no puede satisfacer este requisito. Su salida cambiará a la máxima velocidad posible, que es igual a su SR, figura 17.

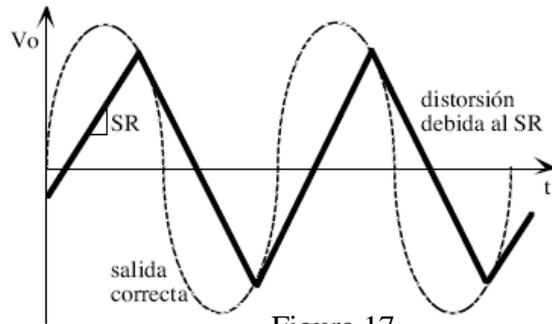


Figura 17

Por ejemplo, consideremos un seguidor de tensión al cual se el aplica un escalón de tensión de amplitud V . La salida del A.O. no podría elevarse instantáneamente al valor V . En cambio, la respuesta será una rampa de pendiente igual a SR . La salida entonces estará limitada por la velocidad respuesta máxima del A.O, figura 18. La limitación en la respuesta se asocia a efectos capacitivos que no permiten la variación instantánea de la tensión.

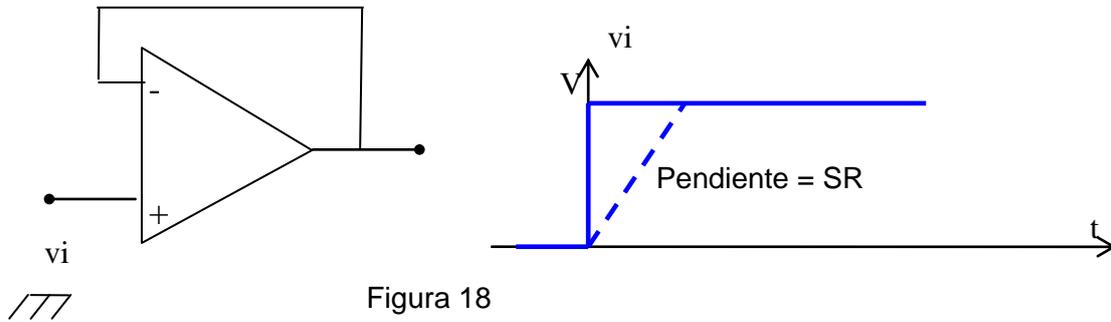


Figura 18