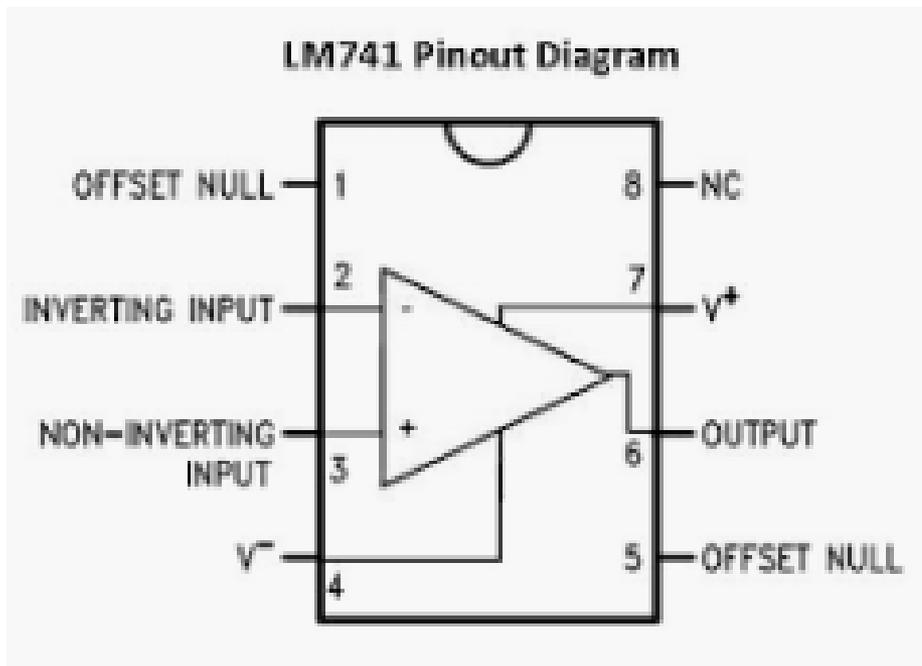


# AMPLIFICADORES OPERACIONALES



LM741 Amplificador Operacional de proposit...



Amplificador operacional - Wikipedia, la...

# 10-1 INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

- Los primeros amplificadores operacionales (amps – op) fueron utilizados principalmente para realizar operaciones matemáticas tales como adición, sustracción, integración y diferenciación, de ahí el término *operacional*.
- Estos primeros dispositivos se construyeron con tubos de vacío y funcionaban con altos voltajes.
- Los amplificadores operacionales actuales son circuitos integrales lineales (IC) que utilizan voltajes de cd relativamente bajos y son confiables y baratos.
- El símbolo del amplificador operacional se muestra en la figura 1:

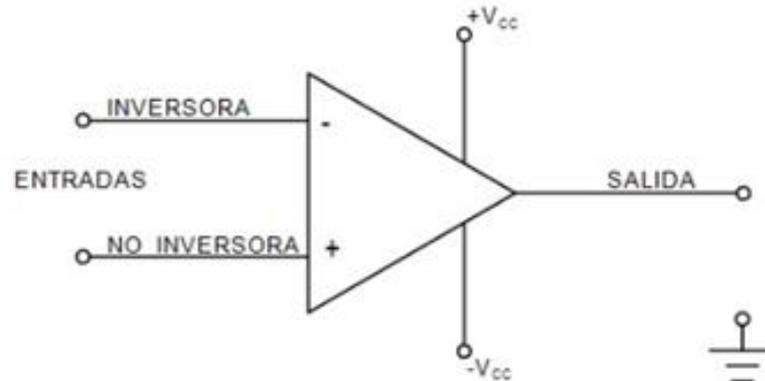
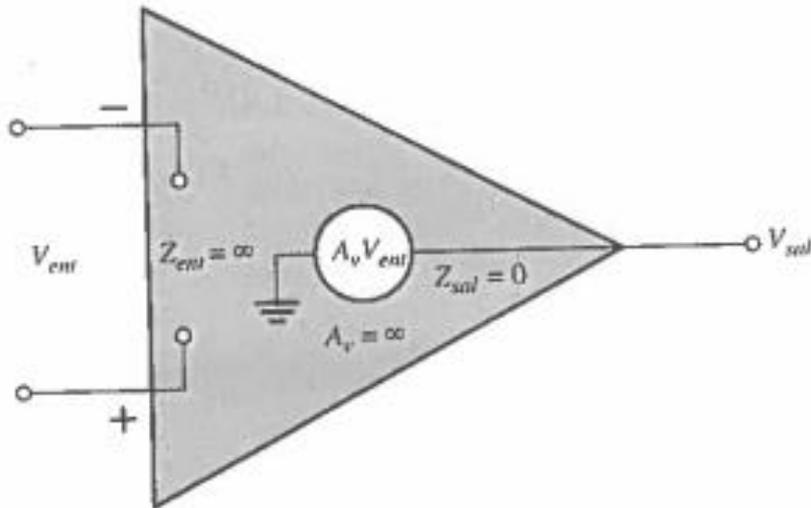


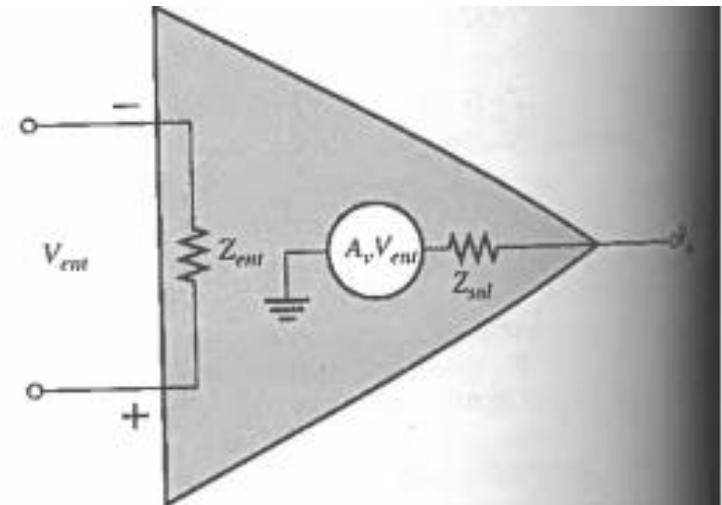
Figura 1

# El Amplificador Operacional Ideal

- El amplificador operacional ideal tiene una *ganancia de voltaje infinita* y un *ancho de banda infinito*. También tiene una *impedancia de entrada infinita* (circuito abierto) de modo que no carga la fuente de excitación. Por último tiene una *impedancia de salida cero*. Estas características se ilustran en la figura (a).



(a) Representación de un amplificador operacional ideal



(b) Representación de un amplificador operacional práctico

# El Amplificador Operacional Práctico

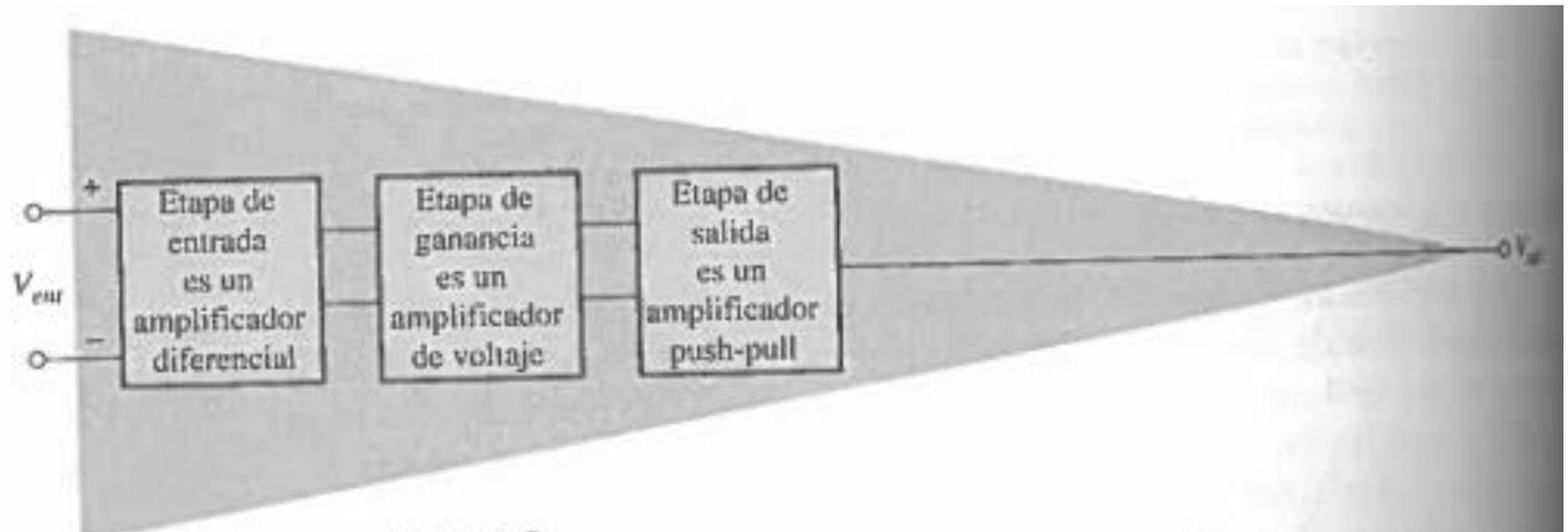
- Aún cuando los valores de parámetro de los amplificadores operacionales en **circuitos integrados (CI)** pueden ser tratados como ideales en muchos casos, nunca se ha fabricado un dispositivo ideal. Cualquier dispositivo tiene limitaciones y el amplificador operacional en circuito integrado no es la excepción.
- Los amplificadores operacionales tienen limitaciones de voltaje y corriente. El voltaje de salida de pico a pico, por ejemplo, normalmente se limita a un poco menos que los dos voltajes de alimentación. La corriente de salida también está limitada por restricciones internas tales como la disipación de potencia y los valores nominales de los componentes.
- Las características de un amplificador operacional práctico son una *ganancia de voltaje muy alta, una impedancia de entrada muy alta, una impedancia de salida muy baja y ancho de banda amplio como se muestra en la figura (b)*

# Diagrama de Bloques Interno de un Amplificador Operacional

- Un amplificador operacional típico se compone de tres tipos de circuitos amplificadores: un amplificador diferencial, un amplificador de voltaje y un amplificador push – pull como muestra la figura 10 -3.
- **El amplificador diferencial** es la etapa de entrada del amplificador operacional. Amplifica la diferencia de voltaje entre las dos entradas.
- **La segunda etapa** casi siempre es un amplificador clase A que proporciona ganancia adicional. Algunos amplificadores operacionales pueden tener más de una etapa de amplificador de voltaje .
- En general en la tercera etapa se utiliza un amplificador clase clase B push – pull para la etapa de salida.

# Diagrama de Bloques Interno de un Amplificador Operacional (Cont...)

- El término *diferencial* se deriva de la capacidad del amplificador para amplificar la diferencia de las dos señales de entrada aplicadas a sus entradas. Sólo se amplifica la diferencia de las dos señales; si no hay ninguna diferencia, la salida es cero
- El amplificador diferencial exhibe dos modos de operación basados en el tipo de señales de entrada. Estos son: en *modo diferencial* y en *modo común*.



# 10-2 MODOS DE ENTRADA A UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL Y PARÁMETROS

## *Modos de la señal de entrada*

- Recuerde que la etapa de entrada del amplificador diferencial determina los modos de la señal de entrada.

## *Modo diferencial*

- En el modo diferencial se aplica una señal a una entrada con la otra conectada a tierra, o se aplica dos señales de polaridad opuesta a las entradas. Cuando un amplificador operacional opera en el modo diferencial de una sola terminal, una entrada se conecta a tierra y se aplica un voltaje de señal a la otra entrada, como se muestra en la figura 10-4.
- En el caso en el que se aplica el voltaje de señal a la entrada inversora como en la parte (a), aparece un voltaje de señal amplificada e invertida a la salida .

## Modo diferencial (Cont...)

- En el caso en el que se aplica la señal a la entrada no inversora con la entrada inversora conectada a tierra, como se muestra en la figura 10-4(b), un voltaje de señal amplificada y no invertida aparece a la salida.

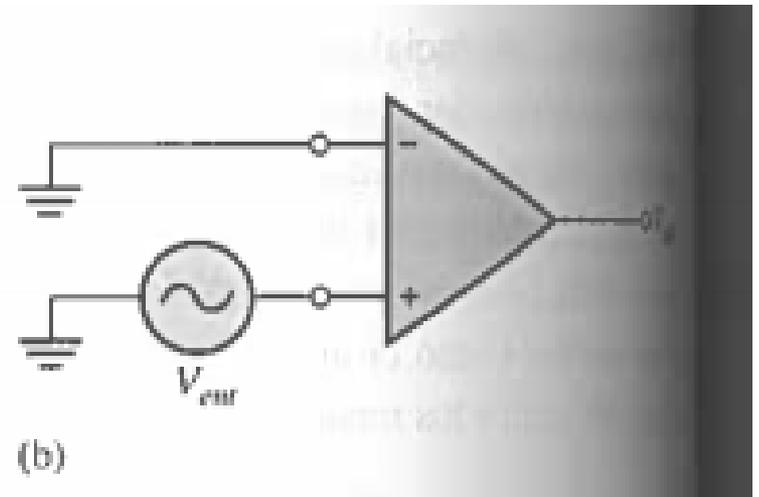
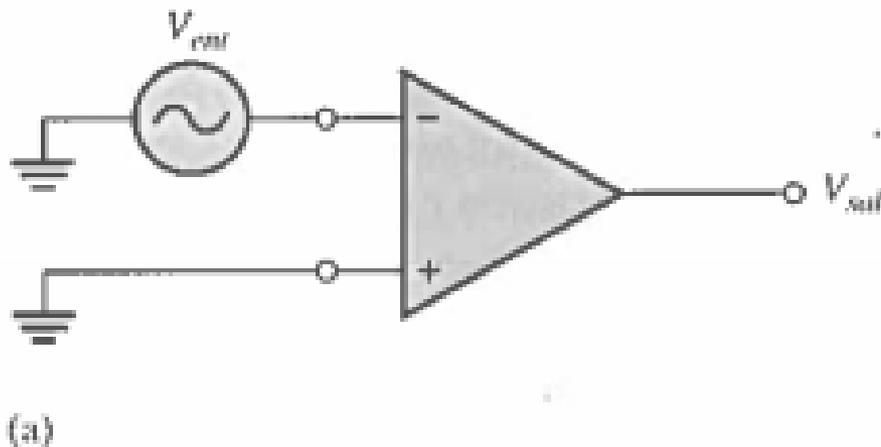
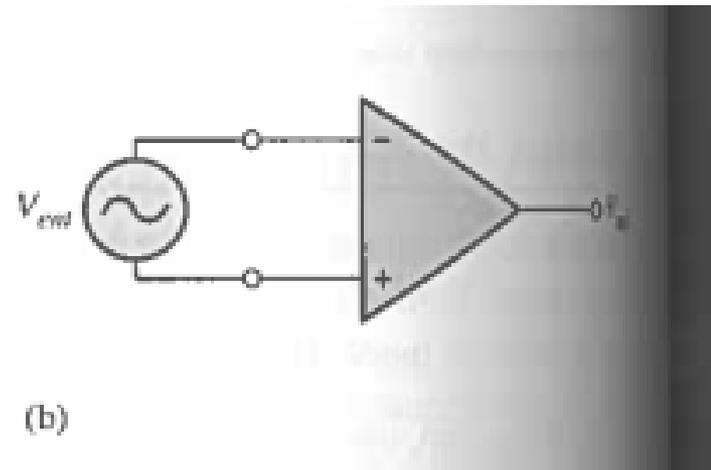
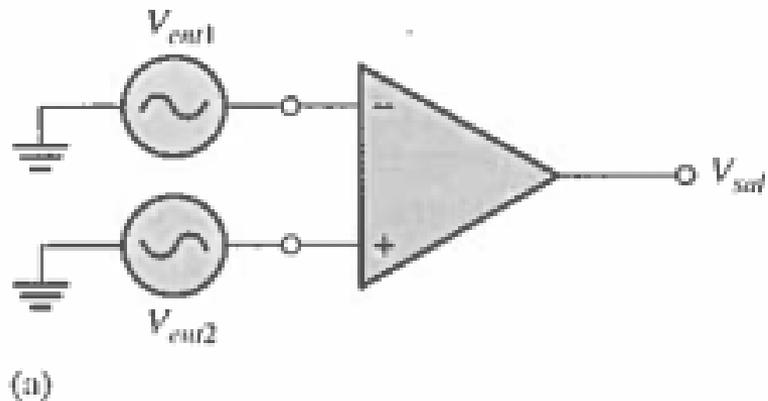


FIGURA 10-4: Modo diferencial de una terminal (a) Inversora; (b) No Inversora

## Modo diferencial (Cont...)

- En el Modo Diferencial de dos terminales se aplican dos señales de polaridad opuesta (desfasadas) a las entradas, como se muestra en la figura 10-5(a). La diferencia entre las dos entradas aparece a la salida amplificada. De forma equivalente, el modo diferencial de dos extremos puede ser representado por una sola fuente conectada entre las dos entradas como se muestra en la figura 10-5(b)



**FIGURA 10-5: Modo diferencial de dos terminales: (a) Voltajes invertidos; (b) Voltajes No Invertidos**

# Modo Común

- En el Modo Común, se aplican dos voltajes de señal de la misma fase, frecuencia y amplitud a las dos entradas, como se muestra en la figura 10-6. Cuando se aplican señales de entrada iguales a ambas entradas, tienden a cancelarse y el resultado es un voltaje de salida cero.

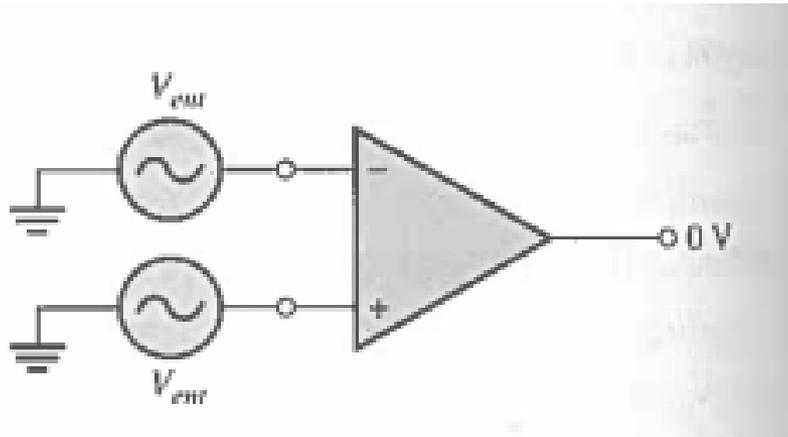


FIGURA 10-6: Operación en Modo Común

- Esta acción se llama **Rechazo en Modo Común**. Su importancia radica en la situación en la que aparece una señal indeseada en ambas entradas del amplificador operacional.

## Modo Común (Cont...)

- Rechazo en Modo Común significa que esta señal indeseada no aparecerá en la salida y distorsionará la señal deseada.
- Las señales en modo común (ruido) en general son el resultado de la captación de energía irradiada en las líneas de entrada, de líneas adyacentes, por ejemplo la línea de transmisión de 60 Hz u otras fuentes.

# Razón de Rechazo en Modo Común

- Las señales indeseadas (ruido) que aparecen con la misma polaridad en ambas líneas de entrada son eliminadas por el amplificador operacional y no aparecen en la salida.
- La habilidad de un amplificador de rechazar señales en modo común es un parámetro llamado **Razón de Rechazo en Modo Común o CMRR**.
- Idealmente, un amplificador operacional proporciona una ganancia muy alta en el caso de señales en modo diferencial y ganancia cero en el caso de señales en modo común.
- Los amplificadores operacionales prácticos, sin embargo, Si presentan una pequeña ganancia en modo común (normalmente menor que 1) al mismo tiempo que proporcionan una alta ganancia de voltaje diferencial en lazo abierto (generalmente de varios miles).

# Razón de Rechazo en Modo Común (Cont...)

- Mientras más alta es la ganancia en lazo abierto con respecto a la ganancia en modo común, mejor es el desempeño del amplificador operacional en función del rechazo de señales en modo común.

$$\text{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$

- Mientras más alta sea la CMRR, mejor.
- Un valor muy alto de CMRR significa que la ganancia en lazo abierto  $A_{ol}$  es alta y que la ganancia en modo común  $A_{cm}$  es baja.
- La CMRR a menudo se expresa en decibeles (dB)

$$\text{CMRR} = 20 \log \left( \frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right)$$

- **La ganancia de voltaje en lazo abierto**,  $A_{ol}$  de un amplificador operacional es la ganancia de voltaje interna del dispositivo y representa el cociente del voltaje de salida entre el voltaje de entrada cuando no hay componentes externos.

## Razón de Rechazo en Modo Común (Cont...)

- La ganancia de voltaje en lazo abierto puede variar hasta 200,000 y no es un parámetro bien controlado.
- Las hojas de datos a menudo se refieren a la ganancia de voltaje en lazo abierto como la *ganancia de voltaje de gran señal*.
- Una CMRR de 100,000, por ejemplo, indica que la señal de entrada deseada (diferencial) es amplificada 100,000 veces más que el ruido indeseado (modo común)

**Ejemplo:** Un amplificador operacional tiene una ganancia de voltaje en lazo abierto de 100,000 y una ganancia en modo común de 0.2. Determine la CMRR y expresarla en decibeles.

$$\text{CMRR} = \frac{A_{ol}}{A_{cm}} = \frac{100,000}{0.2} = 500,000 \quad \text{en decibeles:}$$

$$\text{CMRR} = 20 \log (500,000) = 114 \text{ dB.}$$

## Excursión máxima del voltaje de salida ( $V_{O(P-P)}$ )

- Sin señal de entrada, la salida de un amplificador operacional es idealmente de 0V. Este se llama *voltaje de salida del punto de operación*.
- Cuando se aplica una señal de entrada, los límites ideales de la señal de salida pico a pico son  $\pm V_{CC}$ . En la práctica, sin embargo, este ideal puede ser aproximado pero nunca alcanzado,  $V_{O(P-P)}$  varía con la carga conectada al amplificador operacional y se incrementa directamente con la resistencia de la carga. Por ejemplo, una hoja de datos KA741 Fairchild muestra un  $V_{O(P-P)}$  típico de  $\pm 13$  V con  $V_{CC} = \pm 15$  V cuando  $R_L = 2$  K $\Omega$ ,  $V_{O(P-P)}$  se incrementa a  $\pm 14$  V cuando  $R_L = 10$  K $\Omega$ .

# Desequilibrio de voltaje de entrada

- Un amplificador operacional ideal produce cero voltios de salida por cero voltios de entrada. En un amplificador operacional práctico, aparece un pequeño cambio de cd,  $V_{SAL(error)}$  a la salida cuando no se aplica ningún voltaje de entrada diferencial. Su causa principal es una leve disparidad de los voltajes entre la base y el emisor de la etapa de entrada del amplificador diferencial de un amplificador operacional.
- Cuando se especifica en la hoja de datos de un amplificador operacional, *el desequilibrio de voltaje de entrada,  $V_{os}$* , es el voltaje de cd diferencial requerido entre las entradas para forzar la salida a cero voltios.
- Los valores típicos del desequilibrio de voltaje de entrada se encuentran en el intervalo de 2 mV o menos. En el caso ideal, es de 0 V.

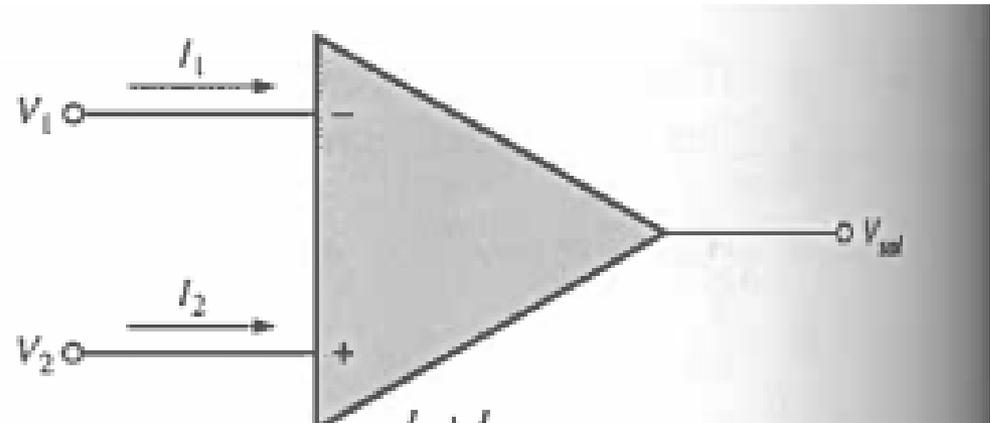
## Desequilibrio de voltaje de entrada (Cont...)

- *La variación del desequilibrio de voltaje de entrada es un parámetro relacionado con  $V_{os}$  que especifica cuánto cambia el desequilibrio de voltaje de entrada por cada cambio de la temperatura de 1 grado. Los valores típicos excursionan desde aproximadamente  $5 \mu\text{V}$  por grado celcius hasta aproximadamente  $50 \mu\text{V}$  por grado Celcius.*
- En general, un amplificador operacional con un valor nominal más alto de desequilibrio de voltaje de entrada exhibe más variación.

# Corriente de polarización de entrada

- Se ha visto que las terminales de entrada de un amplificador diferencial bipolar son las bases del transistor y por consiguiente, las corrientes de entrada son las corrientes en ellas.
- *La corriente de polarización de entrada* es la corriente de cd requerida por las entradas del amplificador operacional para la operación apropiada de la primera etapa. Por definición, la corriente de polarización de entrada es el *promedio* de ambas corrientes de entrada y se calcula de la siguiente manera:

$$I_{\text{POLARIZACIÓN}} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$



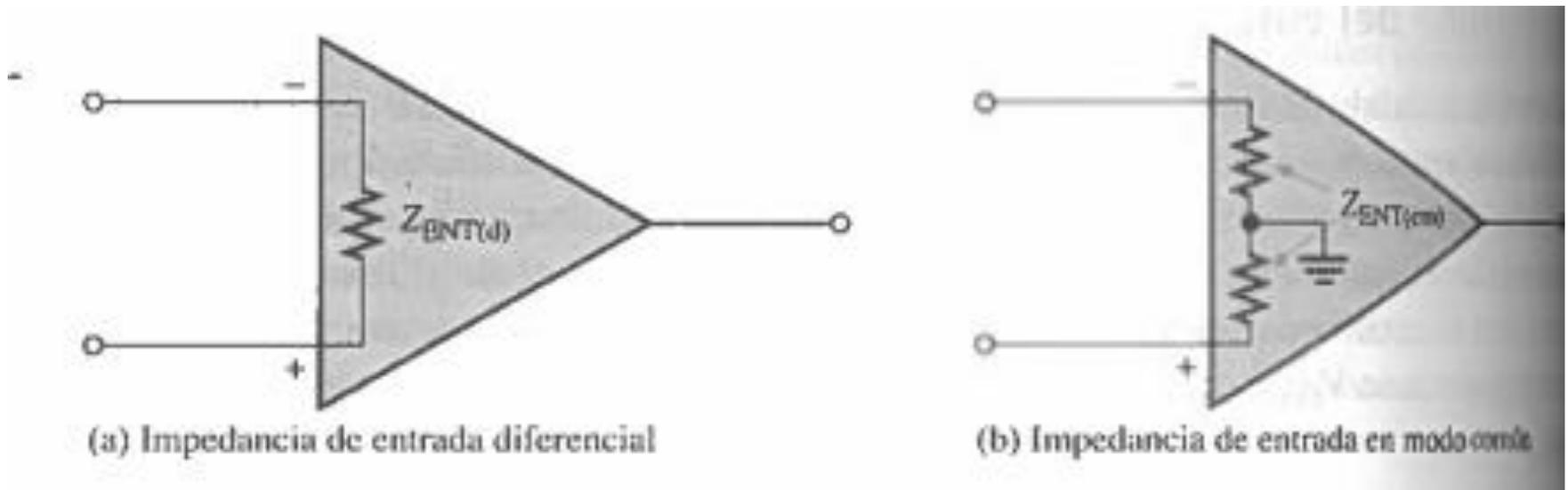
**Figura 10-7:** la corriente de polarización de entrada Es el promedio de las dos Corrientes de entrada al Amplificador operacional

# Impedancia de entrada

- Existen dos formas básicas de especificar la impedancia de entrada de un amplificador operacional son el modo diferencial y en el modo común.
- *La impedancia de entrada diferencial* es la resistencia total entre las entradas inversora y no inversora, como se muestra en la figura 10-8(a)
- La impedancia diferencial, se mide determinando el cambio de la corriente de polarización con un cambio dado del voltaje de entrada diferencial.

# Impedancia de entrada (Cont...)

- *La impedancia de entrada en modo común es la resistencia entre cada entrada y tierra, y se mide determinando el cambio de la corriente de polarización con un cambio dado del voltaje de entrada en modo común, como se muestra en la figura 10-8(b)*



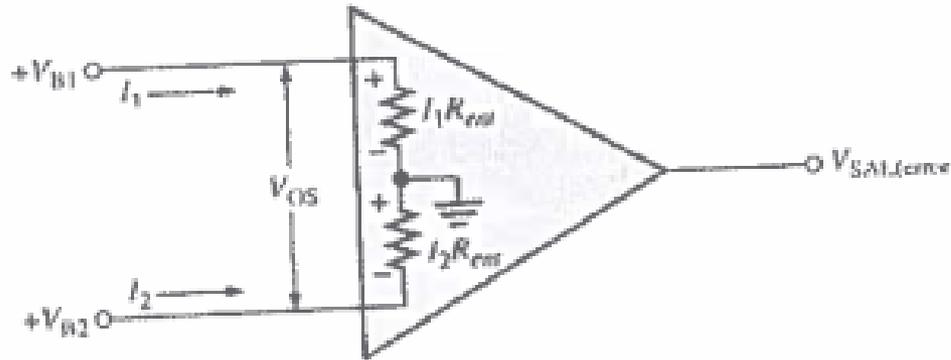
# Desequilibrio de corriente de entrada

- Idealmente, las dos corrientes de polarización de entrada son iguales y por tanto su diferencia es cero.
- En un amplificador operacional práctico, sin embargo, las corrientes de polarización no son exactamente iguales.
- *El desequilibrio de corriente de entrada,  $I_{OS}$*  es la diferencia de las corrientes de polarización de entrada, expresada como un valor absoluto.

$$I_{OS} = |I_1 - I_2|$$

- Las magnitudes reales del desequilibrio de corriente en general son por lo menos (diez veces) menores que la corriente de polarización, por lo que en muchas aplicaciones, el desequilibrio de corriente puede ser despreciado.
- No obstante, los amplificadores de alta ganancia y alta impedancia de entrada deberán tener tan poca  $I_{OS}$  como sea posible porque la diferencia de las corrientes a través de las grandes resistencias de entrada desarrolla un desequilibrio

# Desequilibrio de corriente de entrada (Cont...)



- El desequilibrio de voltaje desarrollado por el desequilibrio de corriente de entrada es:

$$V_{OS} = I_1 R_{ent} - I_2 R_{ent} = (I_1 - I_2) R_{ent}$$

$$V_{OS} = I_{OS} R_{ent}$$

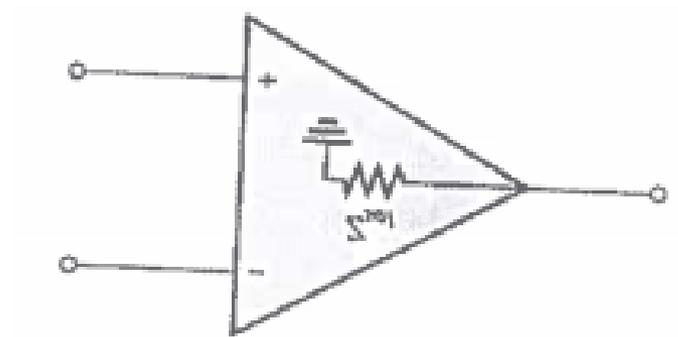
- La ganancia  $A_v$  amplifica el error creado por  $I_{OS}$  y aparece en la salida como

$$V_{SAL(error)} = A_v I_{OS} R_{ent}$$

- Un cambio del desequilibrio de corriente con la temperatura afecta el error de voltaje.
- Los valores del coeficiente de temperatura del desequilibrio de corriente en el intervalo de 0.5 nA por grado Celcius son comunes.

# Impedancia de salida

- *La impedancia de salida* es la resistencia vista desde la terminal de salida del amplificador operacional, como se indica en la figura 10-10.



**Figura: 10-10**

Impedancia de salida de un amplificador operacional

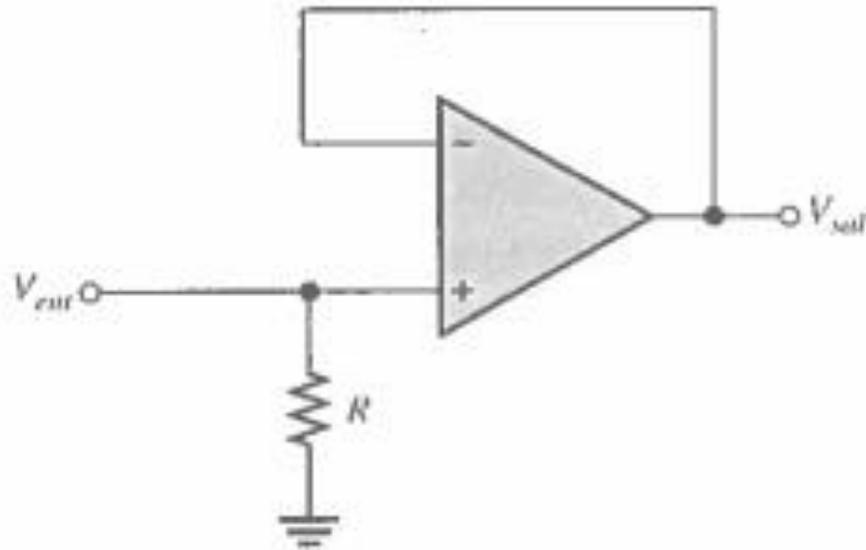
# Rapidez de variación de voltaje

- La rapidez de cambio máxima de voltaje de salida en respuesta a un voltaje de entrada escalón es la **rapidez de variación de voltaje** de un amplificador operacional.
- La rapidez de variación de voltaje depende de la respuesta en alta frecuencia de las etapas dentro del amplificador operacional.
- La rapidez de variación de voltaje se mide con un amplificador operacional conectado, como se muestra en la figura 10-11(a). Estas conexiones de amplificador operacional particular es una configuración no inversora de ganancia unitaria que se analizará más adelante. Esta da la rapidez de variación de voltaje del peor caso (más lenta)

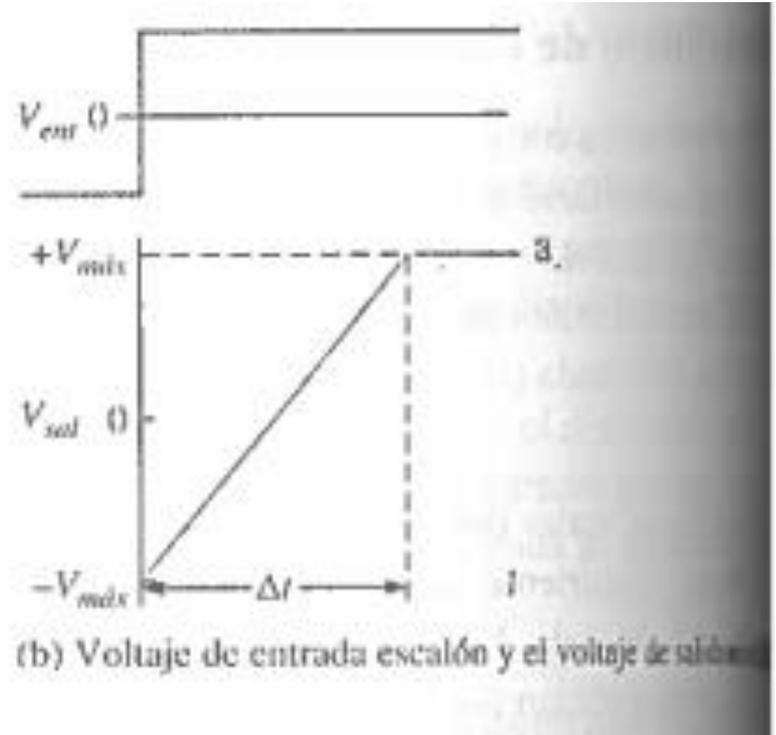
$$\text{Rapidez de variación de voltaje} = \frac{\Delta V_{sal}}{\Delta t}$$

- Donde  $\Delta V_{sal} = + V_{m\acute{a}x} - (- V_{m\acute{a}x})$ . La unidad de la rapidez de variación de voltaje es voltios por micro segundo ( $V/\mu S$ )

# Rapidez de variación de voltaje (Cont...)



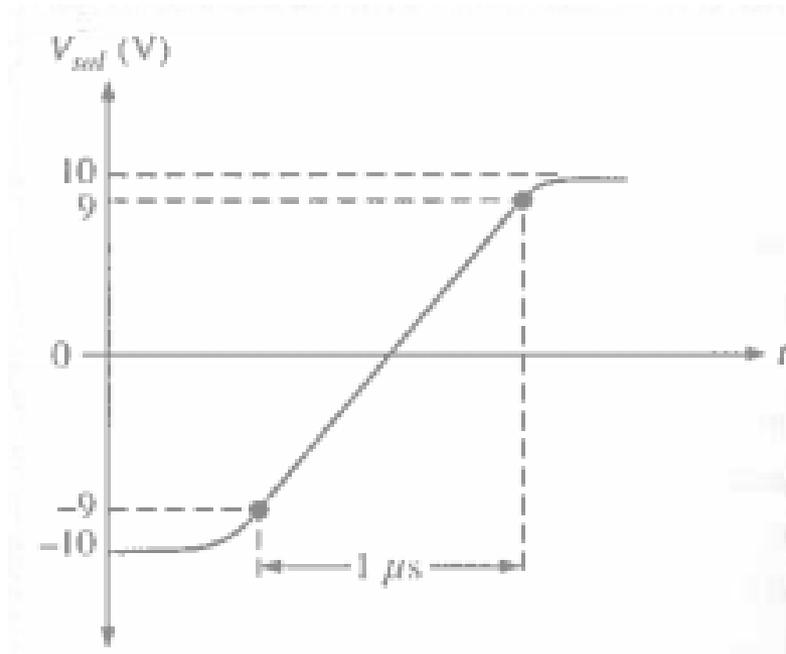
(a) Circuito de prueba



(b) Voltaje de entrada escalón y el voltaje de salida

# Rapidez de variación de voltaje (Cont...)

**Ejemplo:** El voltaje de salida de un cierto amplificador operacional aparece como se muestra en la figura en respuesta a una entrada escalón. Determinar la rapidez de variación de voltaje.



**Solución:** La salida cambia del límite inferior al superior en  $1 \mu s$ , como esta respuesta no es ideal, los límites se toman en los puntos correspondientes al 90%, por lo tanto el límite superior es de +9 V y el inferior es de -9 V.

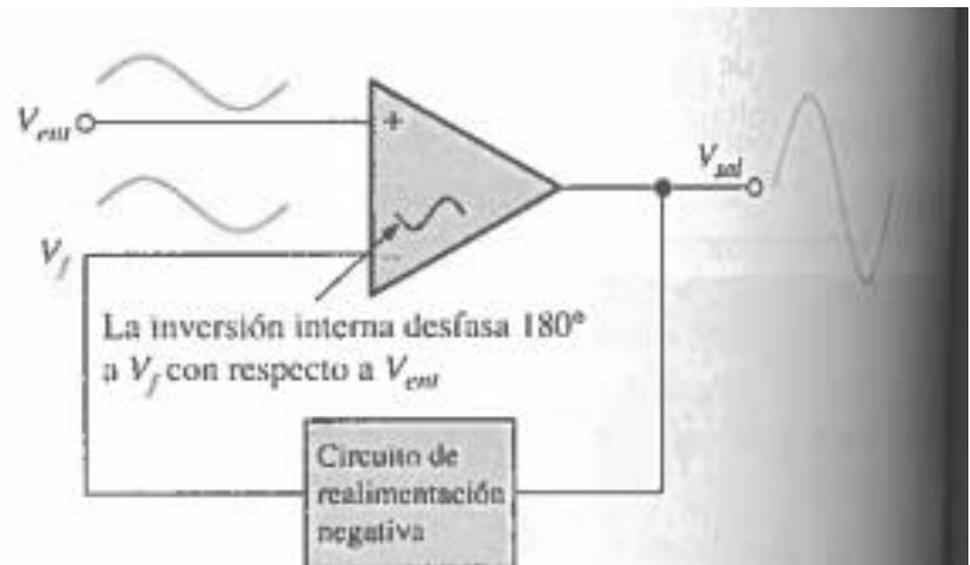
$$\text{Rapidez de variación de voltaje} = \frac{\Delta V_{sal}}{\Delta t} = \frac{+9V - (-9V)}{1 \mu s} = 18 \text{ V}/\mu s$$

# Respuesta en frecuencia

- Las etapas internas del amplificador que forman el amplificador operacional tienen ganancias de voltaje limitadas por las capacitancias de las uniones.
- Un amplificador operacional no tiene capacitores de acoplamiento internos, por consiguiente, la respuesta en baja frecuencia se extiende hacia abajo hasta  $0$  Hz).

## 10-3 REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- La realimentación negativa es uno de los conceptos más útiles de la electrónica, sobre todo en aplicaciones de amplificadores operacionales.
- **La realimentación negativa** es el proceso mediante el cuál una parte del voltaje de salida de un amplificador es alimentada de regreso a la entrada con un ángulo de fase que se opone a (o resta de) la señal de entrada.
- La realimentación negativa se ilustra en la figura 10-13. la entrada inversora (-) efectivamente desfasa la señal de realimentación  $180^\circ$  con respecto a la señal de entrada.



**Figura: 10-13**

Ilustración de la Realimentación  
Negativa

# ¿Por qué se utiliza realimentación negativa?

- La ganancia de voltaje en lazo abierto de un amplificador operacional típico es muy alta (en general mayor que 100,000). Por consiguiente, un voltaje de entrada extremadamente pequeño lleva al amplificador operacional a sus estados de salida en saturación, por ejemplo, si  $V_{ENT} = 1$  mV y  $A_{ol} = 100,000$ .

$$V_{ENT} A_{ol} = (1 \text{ mV})(100,000) = 100 \text{ V.}$$

- Como el nivel de salida de un amplificador operacional nunca llega a 100 V, se va a un estado de saturación más profundo y la salida se limita a sus niveles de salida máximos, como se muestra en la figura 10-14 tanto con un voltaje de entrada positivo como negativo de 1 mV.

## ¿Por qué se utiliza realimentación negativa? (Cont...)

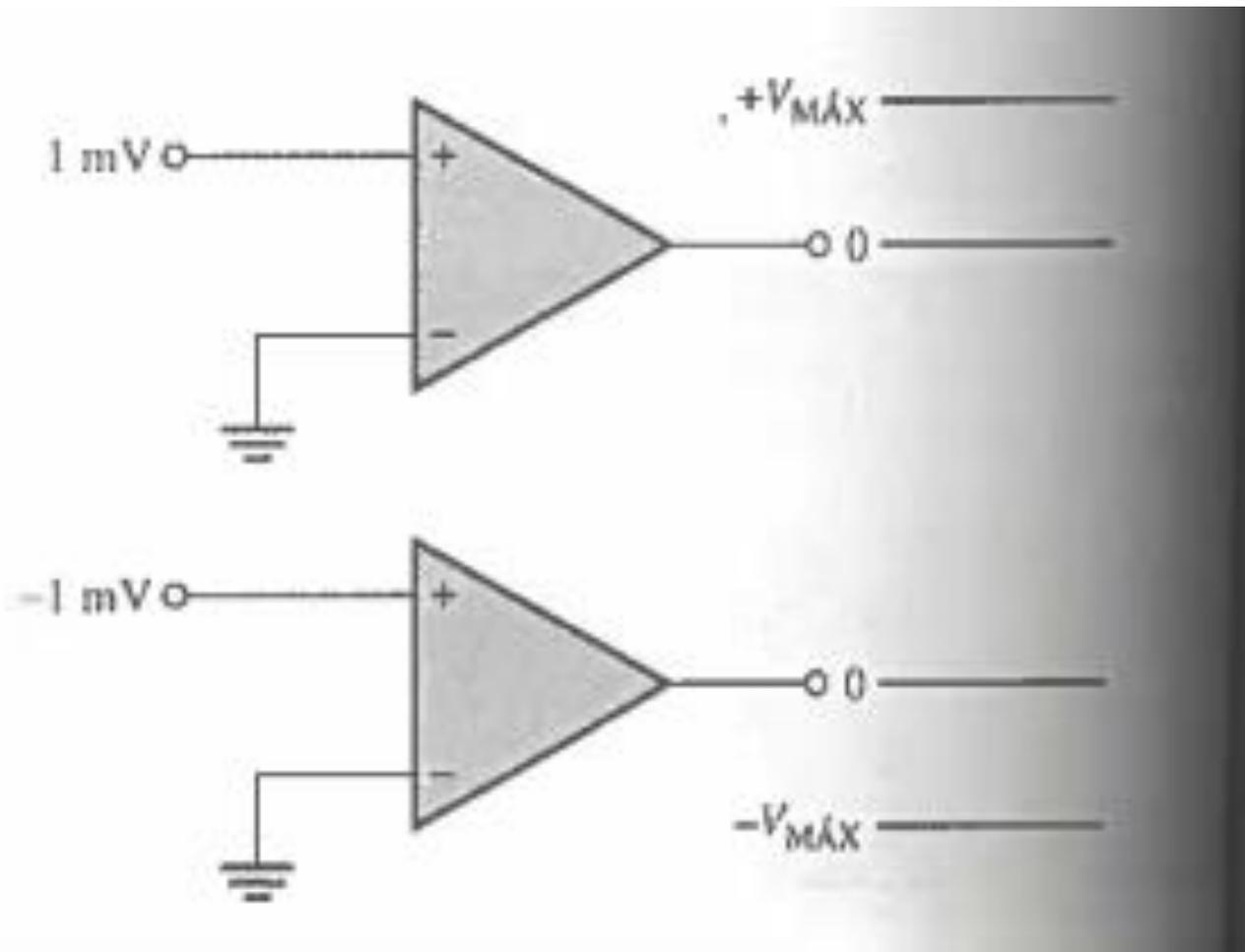


Figura 10-14: Sin realimentación negativa, un pequeño voltaje de entrada lleva al amplificador operacional a sus límites de salida y se vuelve no lineal

## ¿Por qué se utiliza realimentación negativa? (Cont...)

- La utilidad de un amplificador operacional operado sin realimentación negativa en general se limita a aplicaciones de comparación.
- Con realimentación negativa, la ganancia de voltaje en lazo cerrado ( $A_{cl}$ ) se puede reducir y controlar de modo que el amplificador operacional pueda funcionar como amplificador lineal. Además de proporcionar una ganancia de voltaje estable controlada, la realimentación negativa también controla las impedancias de entrada y salida y el ancho de banda del amplificador.

# ¿Por qué se utiliza realimentación negativa? (Cont...)

**TABLA 10 -2**

	GANANCIA DE VOLTAJE	Z DE ENTRADA	Z DE SALIDA	ANCHO DE BANDA
Sin realimentación negativa	Aol es demasiado alta para aplicaciones de amplificador lineal	Relativamente alta	Relativamente baja	Relativamente angosto (porque la ganancia es muy alta)
Con realimentación negativa	Acl es ajustada a un valor deseado por el circuito de realimentación	Puede incrementarse o reducirse a un valor deseado según el tipo de circuito	Puede reducirse a un valor deseado	Significativamente más ancho

## 10-4 AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON REALIMENTACIÓN NEGATIVA

- Se puede conectar un amplificador operacional utilizando realimentación negativa para estabilizar la ganancia e incrementar la respuesta en frecuencia.
- La realimentación negativa toma una parte de la salida y la aplica a la entrada inversora para reducir la ganancia ya que esta se desfasa  $180^{\circ}$  respecto a la entrada no inversora. Esta ganancia en lazo cerrado normalmente es mucho menor que la ganancia en lazo abierto e independiente de ella.
- En esta sección analizaremos las configuraciones de amplificador operacional: no inversor, seguidor de voltaje e inversor.

# Ganancia de voltaje en lazo cerrado

- La ganancia de voltaje en lazo cerrado es la ganancia de voltaje de un amplificador operacional con realimentación externa.
- La configuración se compone del amplificador operacional y un circuito de realimentación negativa externo que conecta la salida con la entrada inversora.
- Los valores de los componentes determinan y controlan con precisión la ganancia de voltaje en lazo cerrado.

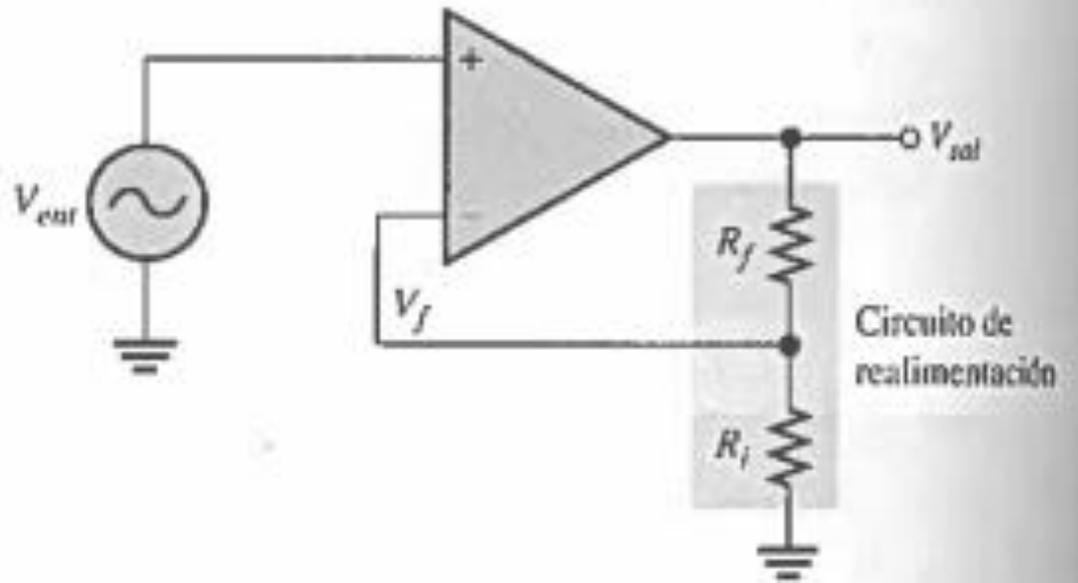
# Amplificador no inversor

- En la figura 10 -15 se muestra un amplificador operacional conectado en una configuración en **lazo cerrado** como **amplificador no inversor** con una cantidad controlada de ganancia de voltaje.
- Se aplica la señal de entrada a la entrada no inversora (+).
- La salida se vuelve a aplicar a la entrada inversora ( - ) por medio del circuito de realimentación (lazo cerrado) formado por el resistor de entrada  $R_i$  y el resistor de realimentación  $R_f$ , esto crea realimentación negativa.
- Los resistores  $R_i$  y  $R_f$  forman un circuito divisor de voltaje que reduce el  $V_{sal}$  y conecta el voltaje reducido  $V_f$  a la entrada inversora, el voltaje de realimentación se expresa como:

$$V_f = \left( \frac{R_i}{R_i + R_f} \right) V_{sal}$$

# Amplificador no inversor (Cont...)

$$V_f = \left( \frac{R_f}{R_f + R_i} \right) V_{sal}$$



**Figura 10 – 15:**  
*Amplificador no inversor*

- La diferencia del voltaje de entrada,  $V_{entr}$  y el voltaje de realimentación  $V_f$ , es la entrada diferencial al amplificador operacional como se muestra en la figura 10 – 16.
- Este voltaje diferencial es amplificado por la ganancia de voltaje en lazo abierto del amplificador operacional ( $A_{ol}$ ) y produce un voltaje de salida expresado como:

# Amplificador no inversor (Cont...)

$$V_{sal} = A_{ol} (V_{ent} - V_f)$$

- La atenuación B, del circuito de realimentación es:

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f}$$

$$V_{sal} = A_{ol} (V_{ent} - BV_{sal})$$

$$V_{sal} = A_{ol} V_{ent} - A_{ol} BV_{sal}$$

$$V_{sal} + A_{ol} BV_{sal} = A_{ol} V_{ent}$$

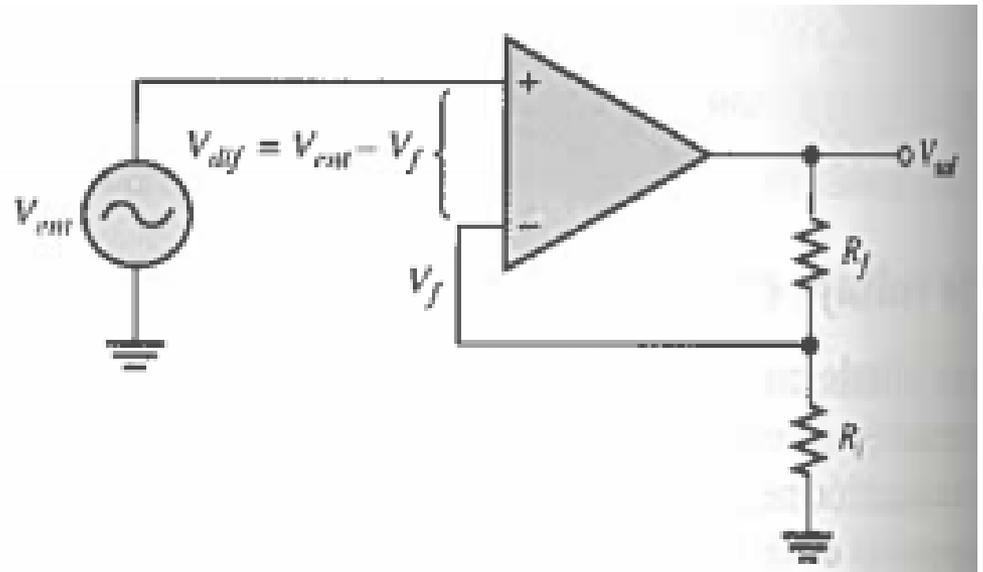
$$V_{sal} (1 + A_{ol} B) = A_{ol} V_{ent}$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{A_{ol}}{1 + A_{ol} B} ; A_{ol} B \gg 1$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{A_{ol}}{A_{ol} B} = \frac{1}{B}$$

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \approx \frac{1}{B} = \frac{R_i + R_f}{R_i}$$

$$A_{cl} (NI) = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

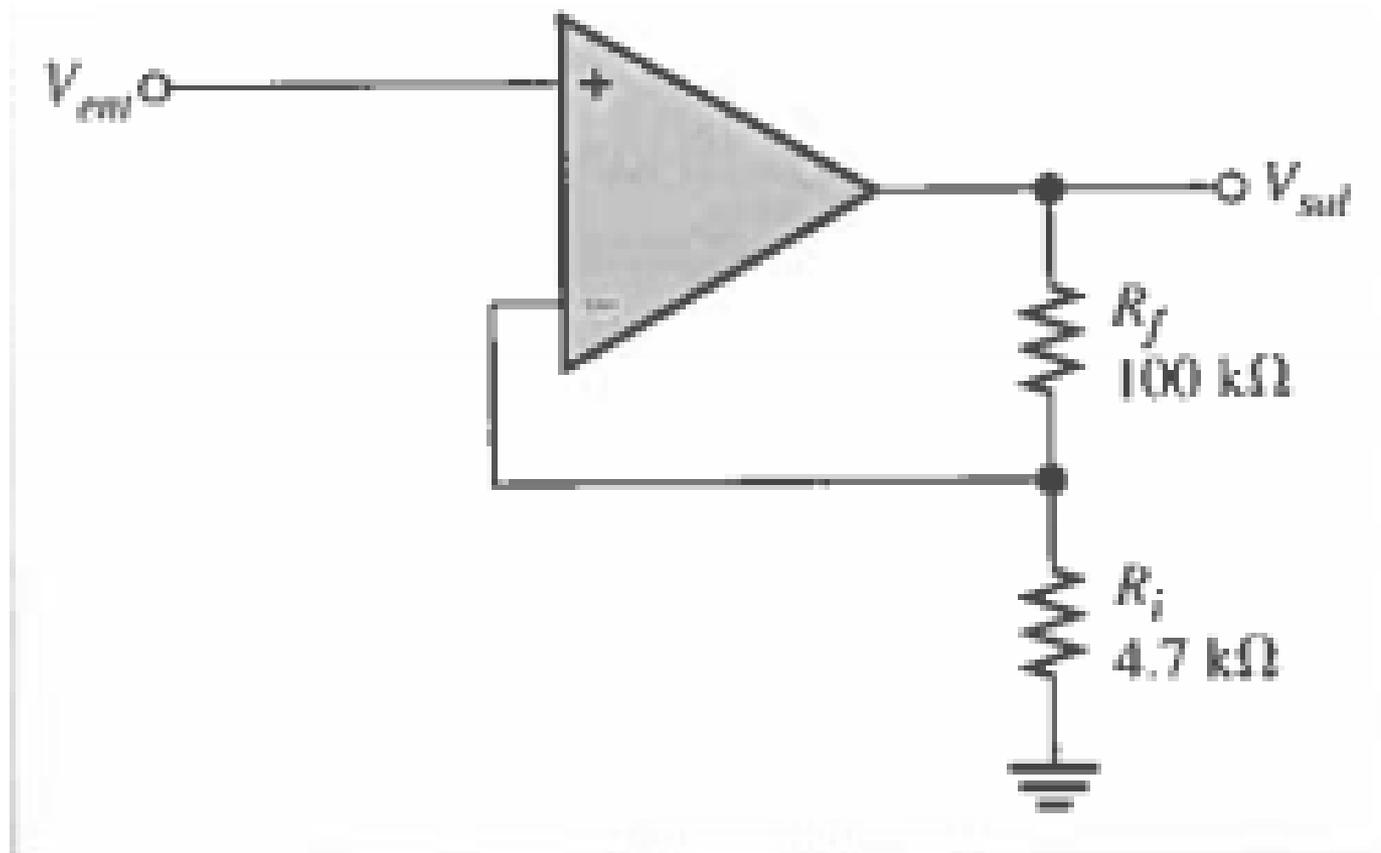


**Figura 10 -16:**

**Entrada Diferencial,  $V_{ent} - V_f$**

## Amplificador no inversor (Cont...)

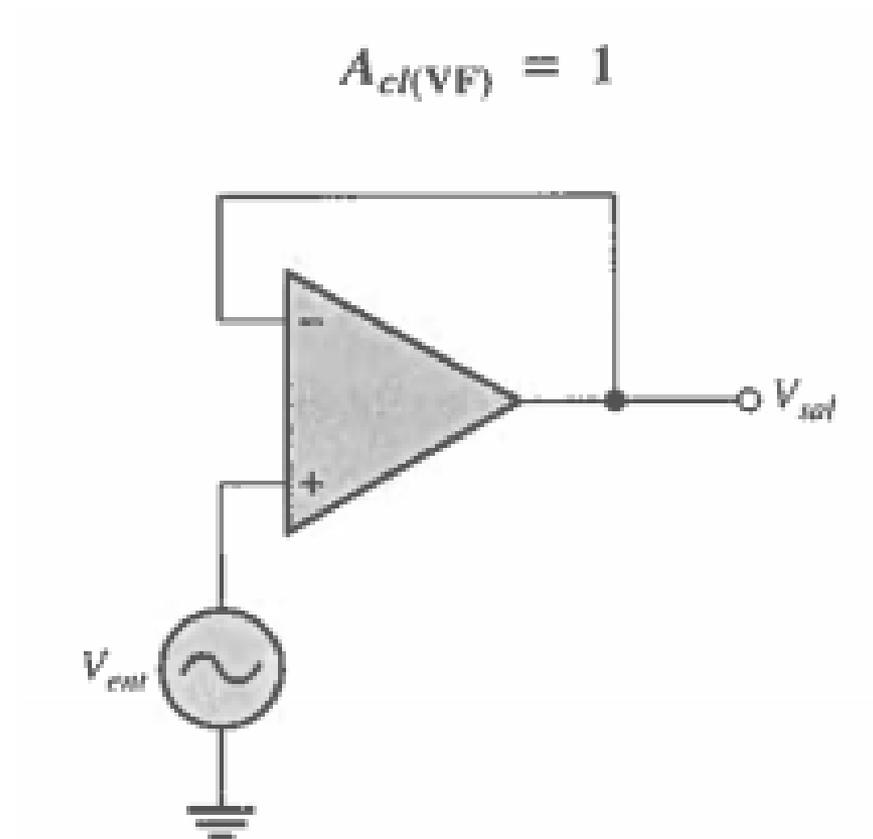
**Ejemplo:** Determine la ganancia de voltaje en lazo cerrado del amplificador que se muestra en la figura.



$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{100 \text{ K}\Omega}{4.7 \text{ K}\Omega} = \mathbf{22.3}$$

# Seguidor de voltaje

- La configuración de **seguidor de voltaje** es un caso especial del amplificador no inversor, donde todo el voltaje de salida es realimentado a la entrada inversora ( - ) mediante una conexión directa como se muestra en la figura 10 – 18.



**Figura 10 – 18:**

*Seguidor de voltaje de  
amplificador operacional*

## Seguidor de voltaje (Cont...)

- La conexión de realimentación directa tiene una ganancia de voltaje de 1 (lo que significa que no hay ganancia).
- En vista que  $B = 1$  para un seguidor de voltaje, la ganancia de voltaje en lazo cerrado del seguidor de voltaje es:

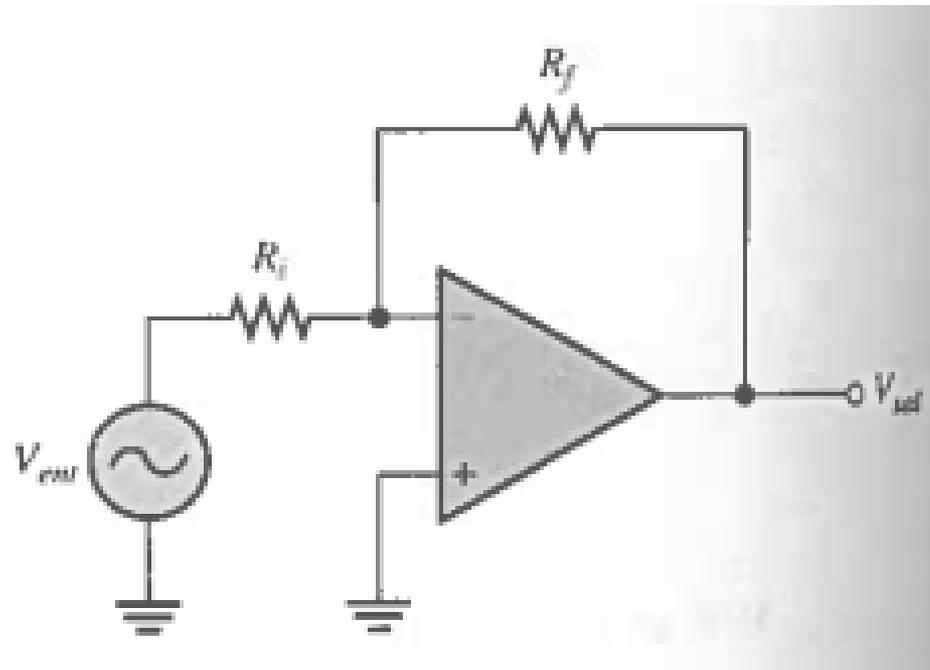
$$A_{cl(VF)} = 1$$

- Las características más importantes de la configuración de seguidor de voltaje son: su muy alta impedancia de entrada y su muy baja impedancia de salida.
- Estas características hacen que esta configuración sea un amplificador separador casi ideal para conectar fuentes de alta impedancia con cargas de baja impedancia

# Amplificador inversor

- Un Amplificador operacional conectado como amplificador inversor con una cantidad controlada de ganancia de voltaje se muestra en la figura 10 – 19.
- La señal de entrada se aplica a través de un resistor de entrada  $R_i$  conectado en serie con la entrada inversora (-).
- La salida es realimentada a través de  $R_f$  a la misma entrada
- La entrada no inversora (+) se conecta a tierra.

**Figura 10 – 19:**  
Amplificador inversor



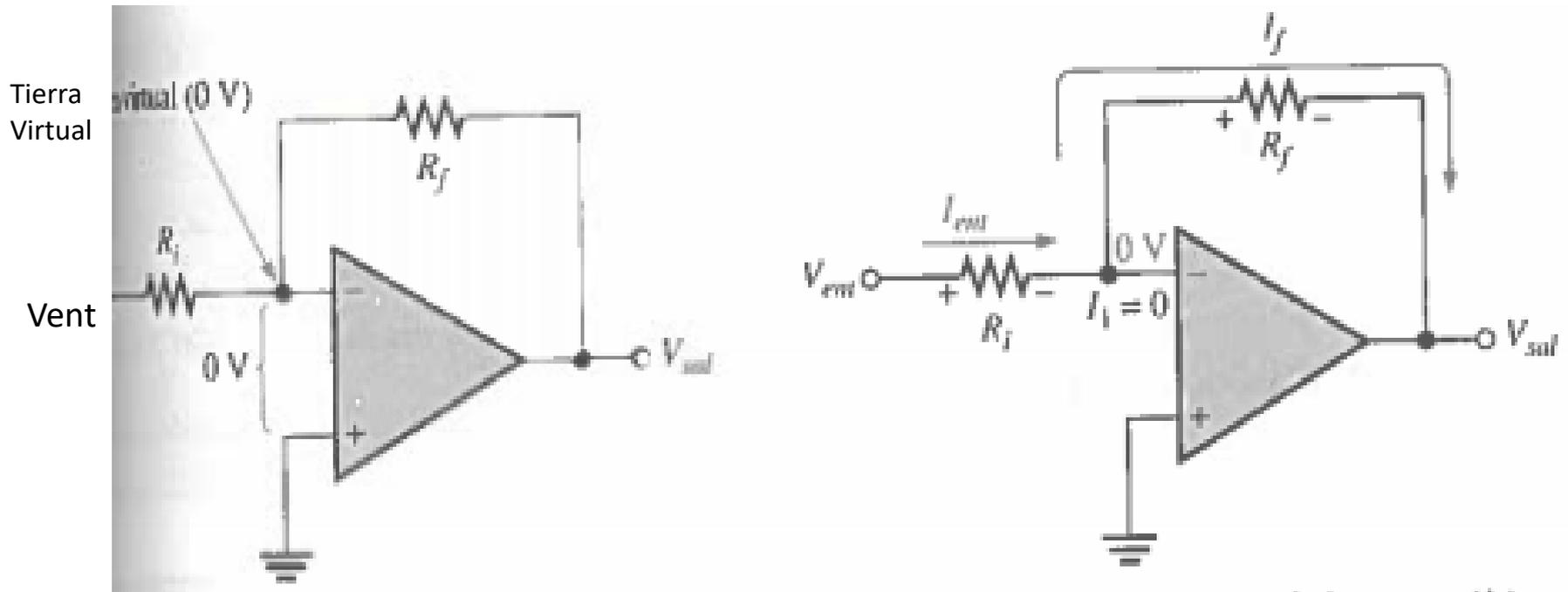
## Amplificador inversor (Cont...)

- Los parámetros de amplificador operacional ideal mencionado con anterioridad son útiles porque simplifican el análisis de este circuito, el concepto de impedancia de entrada infinita es de gran valor.
- Una impedancia de entrada infinita implica corriente cero en la entrada inversora.
- Si existe corriente cero a través de la impedancia de entrada del op-amp, entonces no debe haber voltaje entre las entradas inversora y no inversora, esto significa que el voltaje en la entrada inversora (-) es cero porque la entrada no inversora (+) está conectada a tierra.
- Este voltaje cero en la terminal de entrada inversora se conoce como ***tierra virtual*** y se ilustra en la figura 10 -20(a).
- Como no hay corriente en la entrada inversora, la corriente a través de  $R_i$  y la corriente a través de  $R_f$  son iguales como se muestra en la figura 10 -20(b)

# Amplificador inversor (Cont...)

$$I_{ent} = I_f$$

- El Voltaje a través de  $R_i$  es igual a  $V_{ent}$  porque el resistor está conectado a una tierra virtual en la entrada inversora del amplificador operacional. Por consiguiente:  $I_{ent} = \frac{V_{ent}}{R_i}$



(a) Tierra Virtual

(b)  $I_{ent} = I_f$  y corriente en la entrada Inversora ( $I_1$ ) es cero

**Fig. 10-20:** Concepto de tierra virtual y desarrollo de la  $Acl(I)$

## Amplificador inversor (Cont...)

- El voltaje a través de  $R_f$  es igual a  $-V_{sal}$  debido a la tierra virtual y por consiguiente:

$$I_f = \frac{-V_{sal}}{R_f} ; \quad \text{pero } I_f = I_{ent}$$

$$\frac{-V_{sal}}{R_f} = \frac{V_{ent}}{R_i}$$

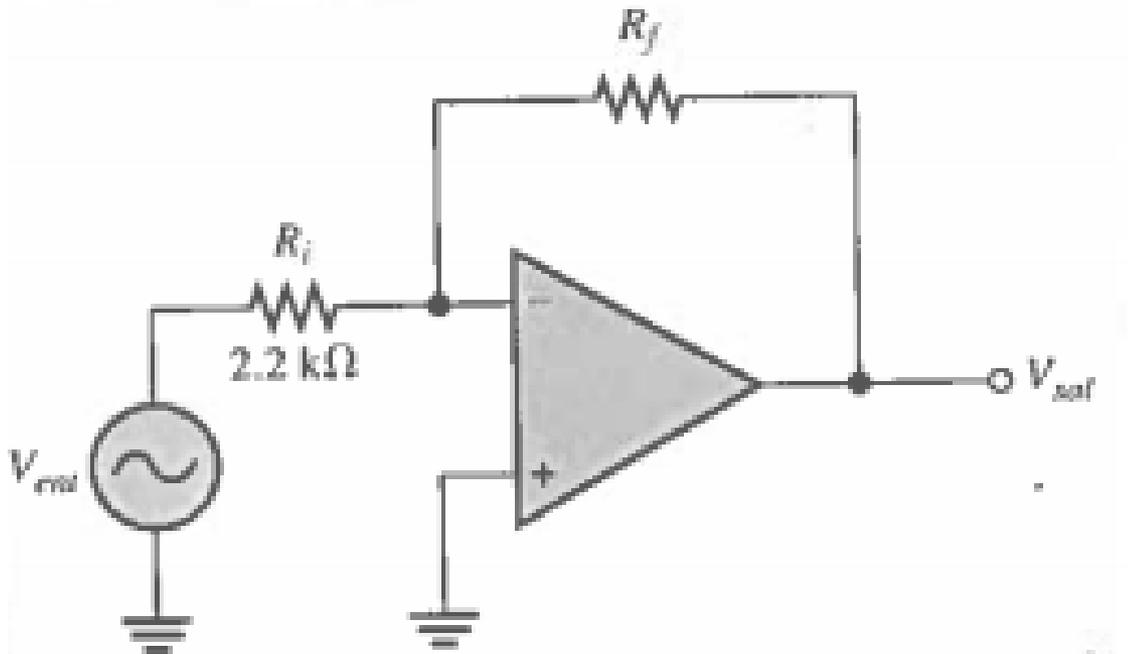
$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = - \frac{R_f}{R_i} ; \quad \text{por lo tanto}$$

$$\mathbf{Acl(I) = - \frac{R_f}{R_i}} \quad \mathbf{Ecuación 10-10}$$

- *La ganancia en lazo cerrado es independiente de la ganancia en lazo abierto interna del amplificador operacional. Por lo tanto, la realimentación negativa estabiliza la ganancia de voltaje.*
- *El signo Negativo significa inversión*

## Amplificador inversor (Cont...)

**Ejemplo:** Dada la configuración de amplificador operacional de la figura, determine el valor de  $R_f$  requerido para producir una ganancia en lazo cerrado de -100.



$$|A_{cl}(f)| = \frac{R_f}{R_i}$$

$$R_f = |A_{cl}(f)| R_i = (100) (2.2 \text{ K}\Omega) = 220 \text{ K}\Omega$$

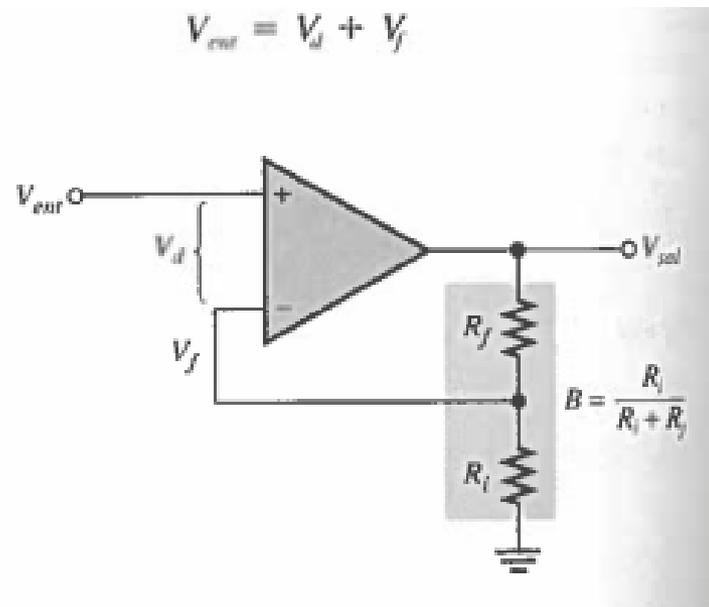
## 10-5 EFECTOS DE LA REALIMENTACIÓN NEGATIVA EN LAS IMPEDANCIAS DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

- La realimentación negativa afecta las impedancias de entrada y salida de un amplificador operacional.
- Al finalizar esta sección debe ser capaz de describir las impedancias de las tres configuraciones de amplificador operacional:
- Determinar las impedancias de entrada y salida de un amplificador no inversor.
- Determinar las impedancias de entrada y salida de un seguidor de voltaje.
- Determinar las impedancias de entrada y salida de un amplificador inversor.

# Impedancias de un amplificador no inversor

## *Impedancia de entrada:*

- La impedancia de entrada de un amplificador operacional no inversor se puede determinar con la ayuda de la figura 10-22.



**Figura 10-22**

- Para este análisis, considérese que existe un pequeño voltaje diferencial  $V_d$  entre las dos entradas. Esto significa que no se puede suponer que la impedancia de entrada del amplificador es infinita o que la corriente de entrada es cero.

## Impedancia de entrada (Cont...)

$V_{ent} = V_d + V_f$                       *sustituyendo  $BV_{sal}$  por  $V_f$  tenemos:*

$V_{ent} = V_d + BV_{sal}$                        $B = R_i / (R_i + R_f)$  y  $V_{sal} \cong A_{ol} V_d$

$V_{ent} = V_d + A_{ol} B V_d = (1 + A_{ol} B) V_d$                       *pero  $V_d = I_{ent} Z_{ent}$*

$V_{ent} = (1 + A_{ol} B) I_{ent} Z_{ent}$

- Donde  $Z_{ent}$  es la impedancia de entrada en lazo abierto del amplificador operacional (sin conexiones de realimentación)

$$\frac{V_{ent}}{I_{ent}} = (1 + A_{ol} B) Z_{ent(ol)}$$

- $V_{ent}/I_{ent}$  es la impedancia de entrada total de una configuración de amplificador no inversor en lazo cerrado.

$$\mathbf{Z_{ent(NI)} = (1 + A_{ol} B)Z_{ent(ol)}} \qquad \mathbf{Ecuación 10-11}$$

- La ecuación 10-11 muestra que la impedancia de entrada del op-amp no inversor con realimentación negativa es mucho más grande que la impedancia interna del op-amp (sin realimentación).

# Impedancia de salida amplificador no inversor

- Con la ayuda de la figura 10-23 se puede desarrollar una expresión para la impedancia de salida de un amplificador **no inversor**.

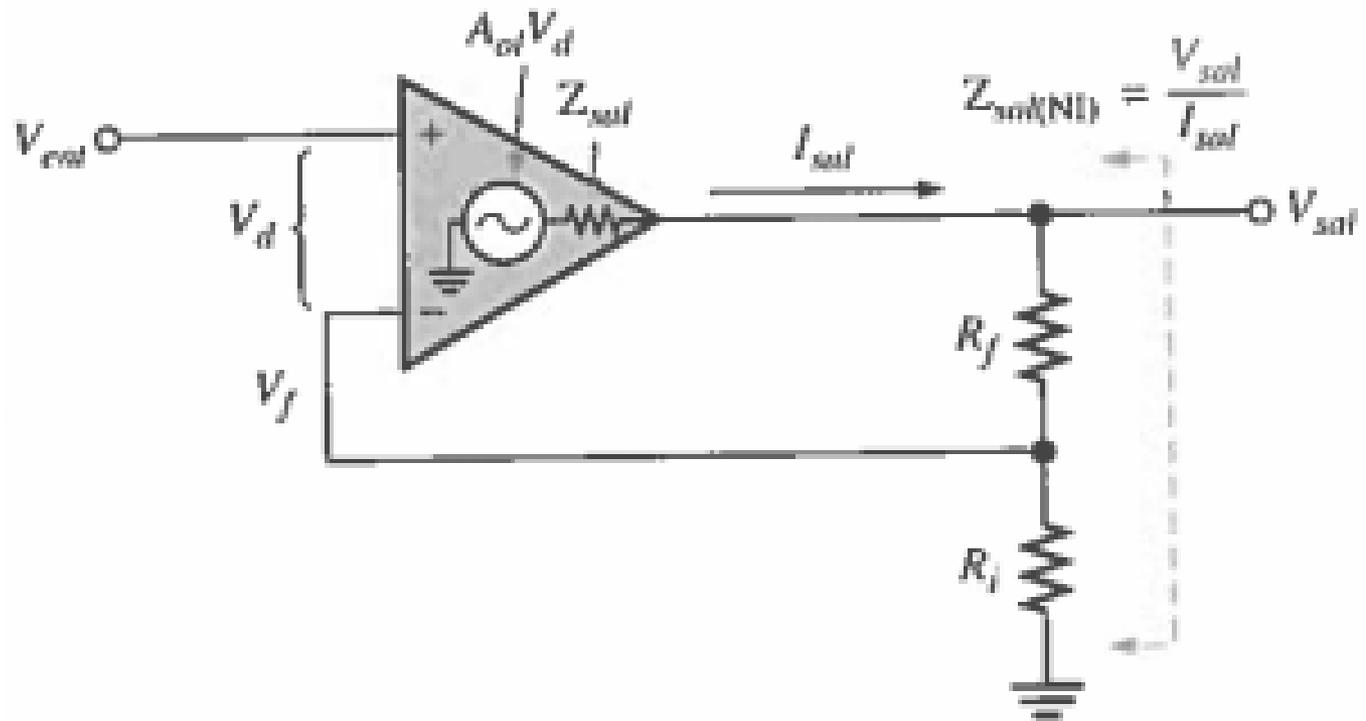


Figura 10-23

## Impedancia de salida amplificador no inversor (Cont...)

- Aplicando la Ley de Voltaje de Kirchhoff al circuito de salida:

$$V_{sal} = A_{ol} V_d - Z_{sal} I_{sal}$$

- El voltaje de entrada diferencial es  $V_d = V_{ent} - V_f$  ; y suponiendo que  $A_{ol} V_d \gg Z_{sal} I_{sal}$ , el voltaje de salida será:

$$V_{sal} \cong A_{ol} (V_{ent} - V_f); \text{ pero } V_f = B V_{sal}$$

$$V_{sal} \cong A_{ol} (V_{ent} - B V_{sal})$$

$$V_{sal} \cong A_{ol} V_{ent} - A_{ol} B V_{sal}$$

$$A_{ol} V_{ent} \cong V_{sal} + A_{ol} B V_{sal} \cong (1 + A_{ol} B) V_{sal}$$

- Como la impedancia de salida del amplificador no inversor es  $Z_{sal} (NI) = V_{sal} / I_{sal}$ , se puede sustituir  $I_{sal} Z_{sal} (NI)$  en lugar de  $V_{sal}$ , por consiguiente:

$$A_{ol} V_{ent} = (1 + A_{ol} B) I_{sal} Z_{sal}(NI)$$

- Dividiendo ambos miembros para  $I_{sal}$  tenemos:

## Impedancia de salida amplificador no inversor (Cont...)

$$\frac{A_{ol} V_{ent}}{I_{sal}} = (1 + A_{ol} B) Z_{sal}(NI)$$

- Pero  $A_{ol} V_{ent} = V_{sal}$

$$\frac{V_{sal}}{I_{sal}} = (1 + A_{ol} B) Z_{sal}(NI)$$

- El primer término es la impedancia de salida interna del op-amp ( $Z_{sal}(ol)$ ) sin realimentación.

$$Z_{sal}(ol) = (1 + A_{ol} B) Z_{sal}(NI)$$

$$Z_{sal}(NI) = \frac{Z_{sal}(ol)}{(1 + A_{ol} B)}$$

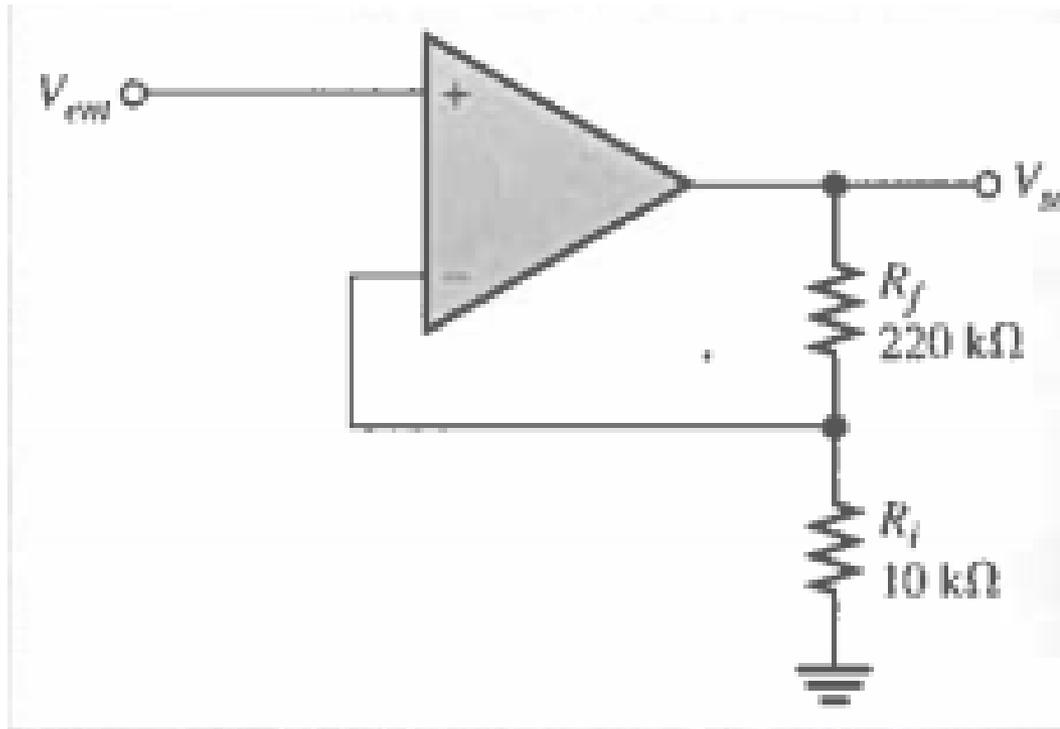
**Ecuación 10-12**

- Esta ecuación muestra que la impedancia de salida de un amplificador no inversor con realimentación negativa es mucho menor que la impedancia de salida interna,  $Z_{sal}(ol)$  del op-amp mismo (sin realimentación) porque  $Z_{sal}(ol)$  está dividido entre el factor  $(1 + A_{ol} B)$ .

# Impedancia de salida amplificador no inversor (Cont...)

## Ejemplo:

- Determine las impedancias de entrada y salida del amplificador no inversor que se muestra en la figura. La hoja de datos de un op-amp da  $Z_{ent} = 2 \text{ M}\Omega$ ,  $Z_{sal} = 75 \Omega$  y  $A_{ol} = 200,000$ .
- Determine la ganancia de voltaje en lazo cerrado



## Impedancia de salida amplificador no inversor (Cont...)

a) Impedancia de entrada:

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{10 \text{ K}\Omega}{230 \text{ K}\Omega} = \mathbf{0.0435}$$

$$Z_{ent} (\text{NI}) = (1 + A_{ol} B) Z_{ent} = [1 + (200,000)(0.0435)] (2 \text{ M}\Omega)$$

$$Z_{ent} (\text{NI}) = (1 + 8,700)(2 \text{ M}\Omega) = \mathbf{17.4 \text{ G}\Omega}$$

Impedancia de salida:

$$Z_{sal} (\text{NI}) = \frac{Z_{sal}}{1 + A_{ol} B} = \frac{75 \Omega}{1 + 8,700} = \mathbf{8.6 \text{ m}\Omega}$$

$$\text{b) } A_{cl} (\text{NI}) = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{220 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega} = \mathbf{23.0}$$

# Impedancias del seguidor de voltaje

- Un seguidor de voltaje es un caso especial de la configuración de amplificador no inversor, se utilizan las mismas fórmulas de impedancia pero con  $B = 1$

$$Z_{ent}(VF) = (1 + A_{ol}) Z_{ent}(ol) \quad \text{Ecuación 10-13}$$

$$Z_{sal}(VF) = \frac{Z_{sal}}{1 + A_{ol}} \quad \text{Ecuación 10-14}$$

- Como se puede observar, la impedancia de entrada del seguidor de voltaje es más grande para una  $A_{ol}$  y  $Z_{ent}(ol)$  dadas que para la configuración de amplificador no inversor con el circuito de realimentación de divisor de voltaje. Además su impedancia de salida es mucho más pequeña.

## Impedancias del seguidor de voltaje (Cont...)

### Ejemplo:

El amplificador operacional del ejemplo anterior se utiliza en una configuración de seguidor de voltaje. Determine las impedancias de entrada y salida.

$$B = 1$$

$$Z_{ent}(VF) = (1 + A_{ol}) Z_{ent}(ol) = (1 + 200,000)(2 \text{ M}\Omega) \cong \mathbf{400 \text{ G}\Omega}$$

$$Z_{sal}(VF) = \frac{Z_{sal}(ol)}{1 + A_{ol}} = \frac{75 \Omega}{1 + 200,000} = \mathbf{375 \mu\Omega}$$

- Observe que  $Z_{ent}(VF)$  es mucho más grande que  $Z_{ent}(NI)$  y  $Z_{sal}(VF)$  es mucho menor que  $Z_{sal}(NI)$

# Impedancias de un amplificador inversor

- Las impedancias de entrada y salida de una configuración de amplificador operacional inversor se determina con la ayuda de la figura 10-25.
- Se aplica tanto la señal de entrada como la realimentación negativa por medio de los resistores a la terminal (-)

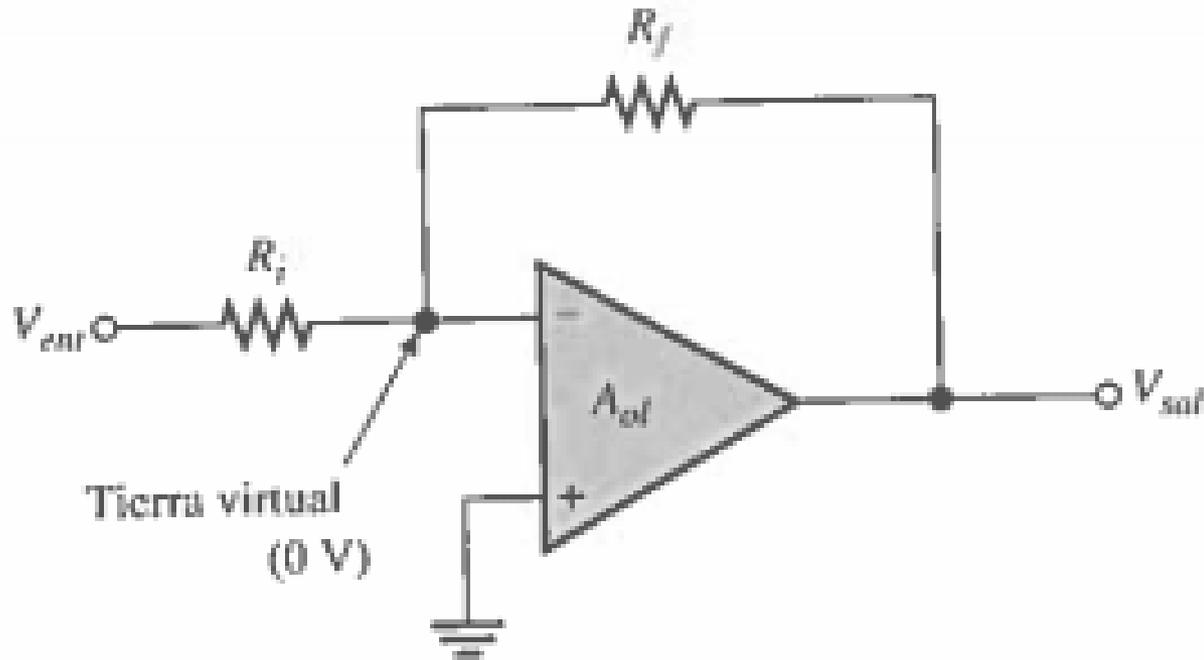


Figura 10-24: Amplificador inversor

# Impedancias de un amplificador inversor (Cont...)

## Impedancia de entrada

- La impedancia de entrada de un amplificador inversor es:

$$Z_{ent(I)} \cong R_i$$

*Ecuación 10-15*

- Esto se debe a que la entrada inversora del amplificador operacional se encuentra conectada a una tierra virtual (0 V) y la fuente de entrada simplemente ve a  $R_i$  conectada a tierra como se muestra en la figura 10-26.



Figura 10-26: Amplificador inversor

# Impedancias de un amplificador inversor (Cont...)

## Impedancia de salida

- Como con un amplificador no inversor, la realimentación negativa reduce la impedancia de salida de un amplificador inversor .
- La expresión de la impedancia de salida para un amplificador inversor es la misma que para el caso del amplificador no inversor.

$$Z_{sal(I)} = \frac{Z_{sal(ol)}}{1+A_{ol} B}$$

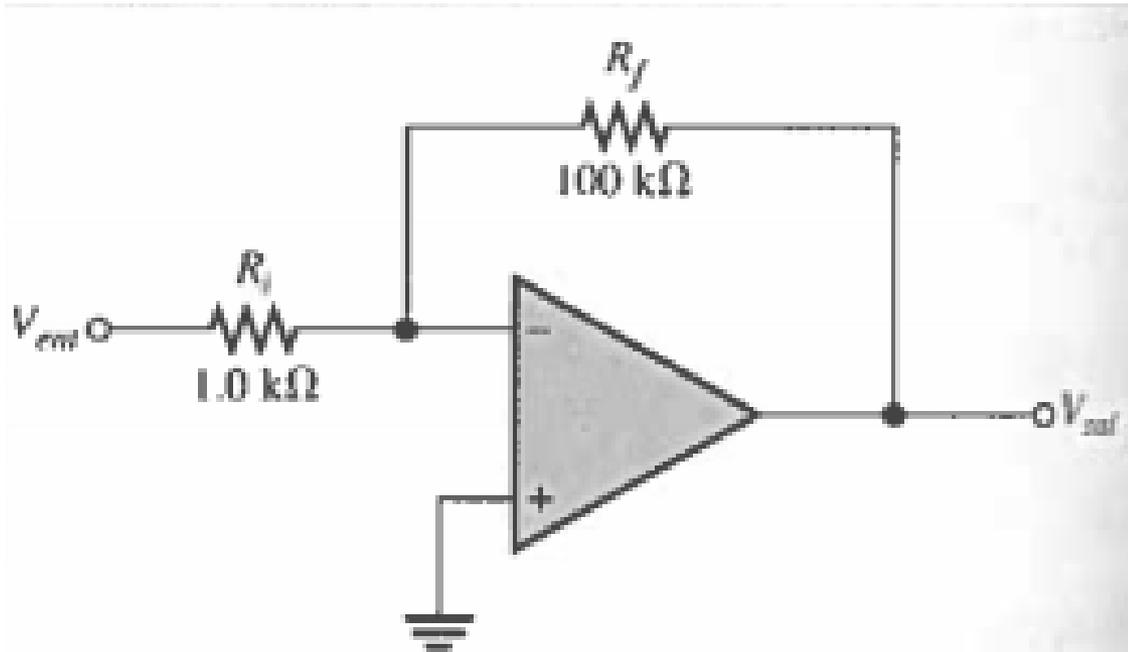
### Ecuación 10-16

- La impedancia de salida tanto del amplificador no inversor como inversor es muy baja, es decir, casi cero en los casos prácticos.
- Debido a esta impedancia de salida casi cero, cualquier impedancia de carga dentro de los límites se puede conectar a la salida.
- Los límites para la impedancia de carga son determinados por la excursión máxima pico a pico de salida ( $V_o(p-p)$ ) y el límite para la corriente del amplificador operacional.

## Impedancias de un amplificador inversor (Cont...)

### Ejemplo:

Determine los valores de las impedancias de entrada y salida del siguiente circuito, también determine la ganancia de voltaje en lazo cerrado. El amplificador operacional tiene los siguientes parámetros:  $A_{ol} = 50,000$ ;  $Z_{ent} = 4 \text{ M}\Omega$ ; y  $Z_{sal} = 50 \Omega$



## Impedancias de un amplificador inversor (Cont...)

$$Z_{ent}(I) \cong R_i = \mathbf{1.0\ K\Omega}$$

- La atenuación de realimentación B es:

$$B = \frac{R_i}{R_i + R_f} = \frac{1.0\ K}{101\ K} = 0.001$$

$$Z_{sal}(I) = \frac{Z_{sal}}{1 + A_{ol} B} = \frac{50}{1 + (50,000)(0.001)} = \mathbf{980\ m\Omega}$$

(para todos los propósitos prácticos)

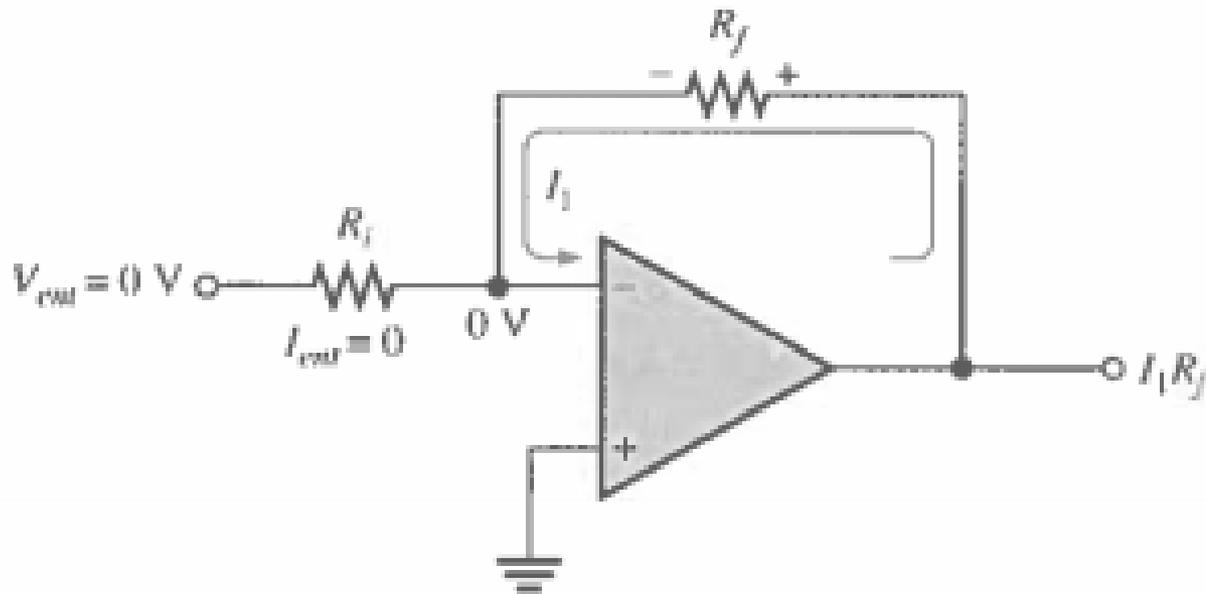
$$A_{cl}(I) = - \frac{R_f}{R_i} = \frac{100\ k}{1.0\ K} = \mathbf{-100}$$

## 10-6 CORRIENTE DE POLARIZACIÓN Y DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE

- El amplificador operacional ideal no tiene corriente de entrada en sus terminales; pero en realidad, el amplificador operacional práctico tiene corrientes de polarización de entrada pequeñas típicamente en el orden de los nA.
- **Al terminar esta unidad el estudiante será capaz de:**
  - Analizar la compensación de un amplificador operacional
    - Describir el efecto de la corriente de polarización de entrada
    - Explicar la compensación mediante corriente de polarización
    - Describir el efecto del desequilibrio de voltaje de entrada
    - Explicar la compensación mediante desequilibrio de voltaje de entrada

# Efecto de la corriente de polarización de entrada

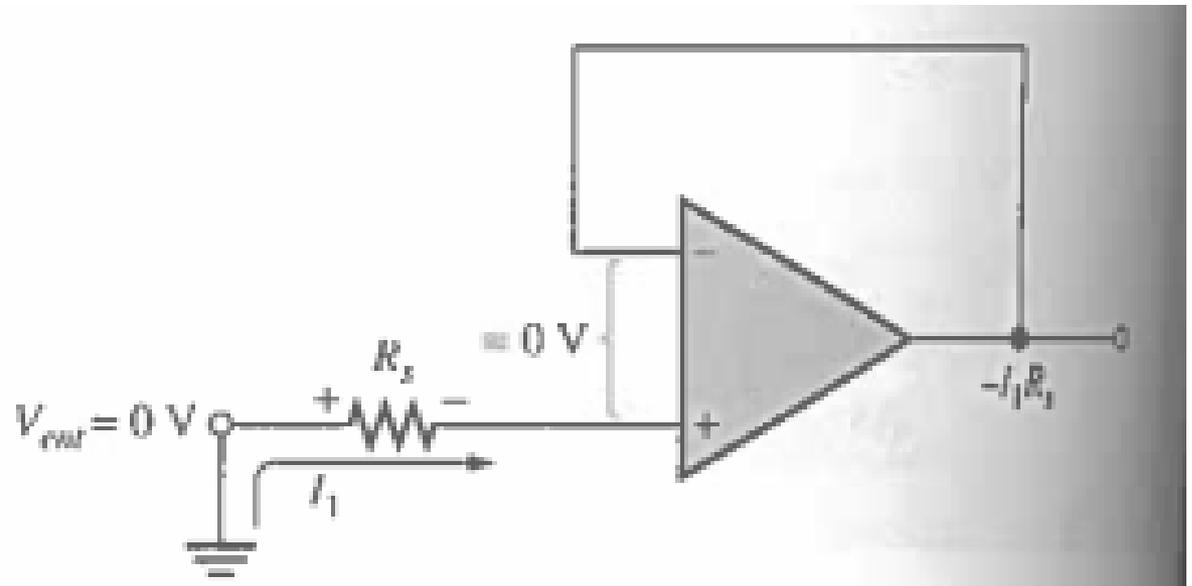
- La figura 10-28 es un amplificador inversor con voltaje de entrada cero. Idealmente, la corriente a través de  $R_i$  es cero porque el voltaje de entrada es cero y el voltaje en la terminal inversora(-) es cero.
- La pequeña corriente de polarización de entrada  $I_1$ , fluye a través de  $R_f$  desde la terminal de salida,  $I_1$  crea una caída de voltaje a través de  $R_f$ . El lado positivo de  $R_f$  es la terminal de salida, y por consiguiente, el voltaje de error de salida es  $I_1 R_f$  cuando debería ser cero.



**Figura 10-28:** La corriente de polarización de entrada crea un voltaje de error de salida ( $I_1 R_f$ ) en un amplificador inversor

## Efecto de la corriente de polarización de entrada (Cont...)

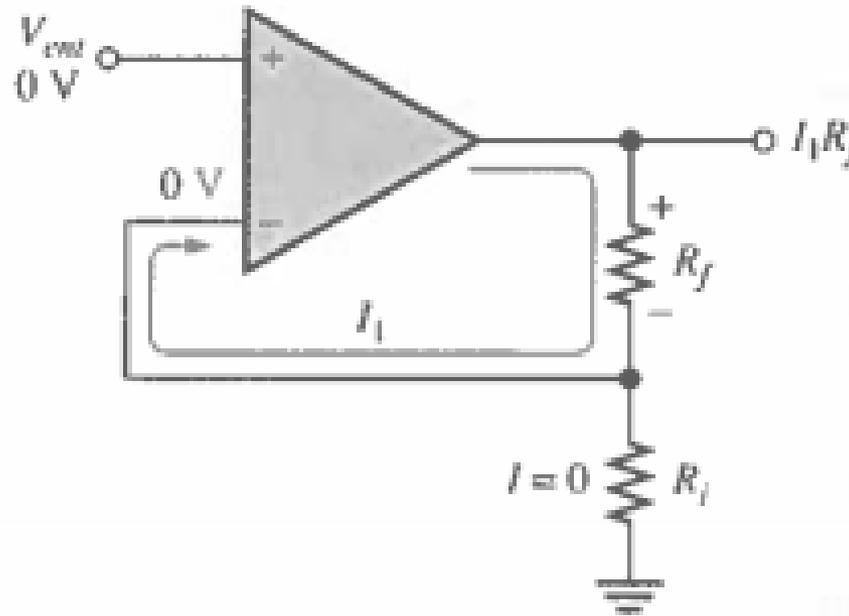
- La figura 10-29 es un seguidor de voltaje con voltaje de entrada cero y una resistencia de la fuente  $R_s$  y crea un error en el voltaje de salida. El voltaje en la terminal de entrada inversora se reduce a  $-I_1 R_s$  porque la realimentación negativa tiende a mantener un voltaje diferencia de cero. Como la terminal inversora está conectada directamente a la terminal de salida, el error en el voltaje de salida es  $-I_1 R_s$



**Figura 10-29:** La corriente de polarización de entrada crea un voltaje de error de salida en un seguidor de voltaje

## Efecto de la corriente de polarización de entrada (Cont...)

- La figura 10-30 es un amplificador no inversor con voltaje de entrada cero. Idealmente el voltaje en la terminal también es cero. La corriente de polarización de entrada  $I_1$ , produce una caída de voltaje a través de  $R_f$  y por tanto, crea un voltaje de error de salida de  $I_1 R_f$  como con el amplificador inversor.



**Figura 10-30:** La corriente de polarización de entrada crea un voltaje de error de salida en un amplificador no inversor.

# Compensación mediante corriente de polarización en un seguidor de voltaje

- El voltaje de error de salida producidas por corrientes de polarización en un seguidor de voltaje puede reducirse suficientemente con la adición de un resistor  $R_f$ , igual a la resistencia de fuente  $R_s$ , en la trayectoria de realimentación como se muestra en la figura 10-31.

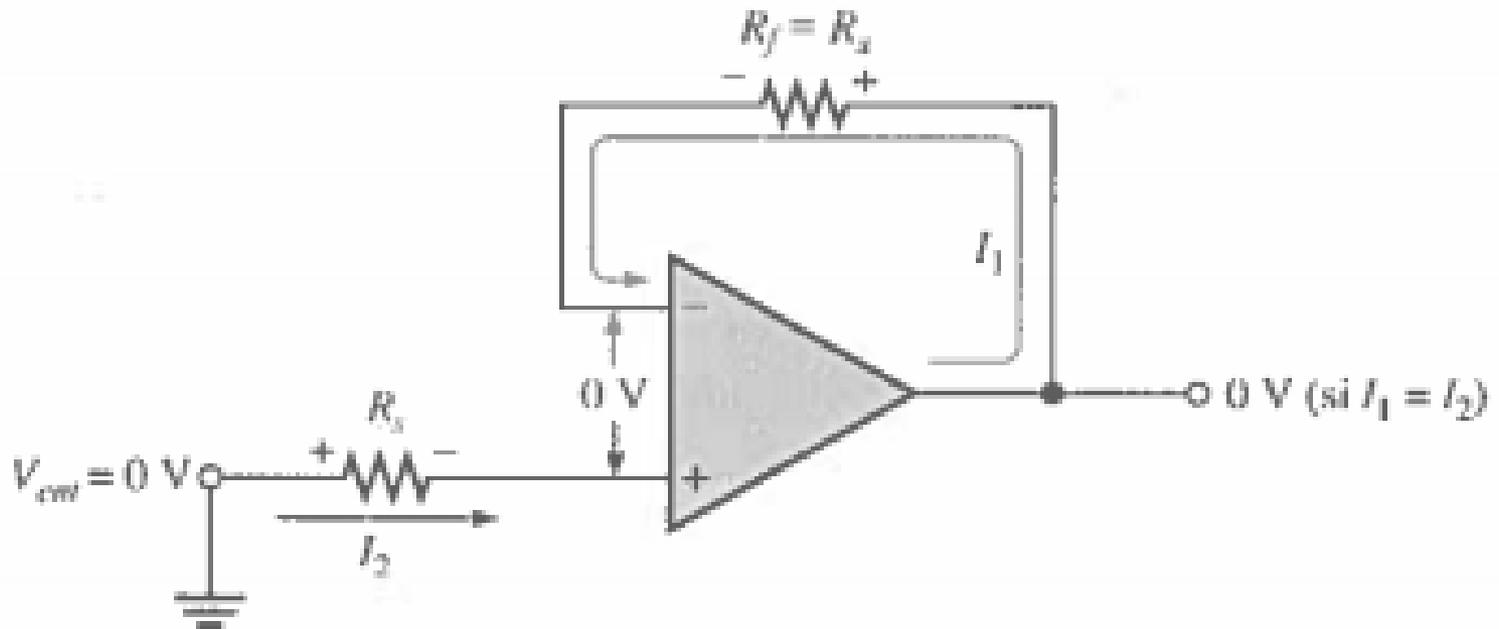


Figura 10-31: Compensación del efecto de la corriente de polarización en un Seguidor de voltaje

# Compensación mediante corriente de polarización en un seguidor de voltaje (cont...)

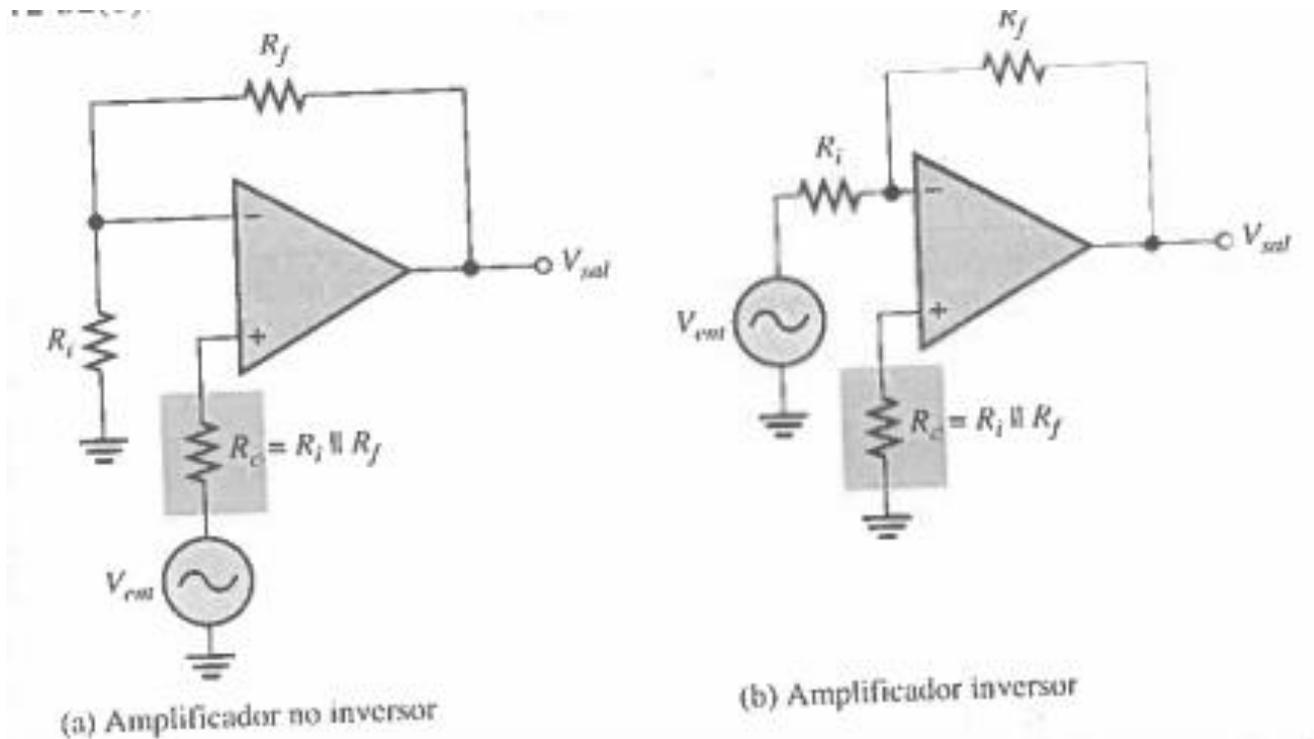
- La caída de voltaje creada por  $I_1$  a través del resistor agregado se resta el voltaje de error de salida  $-I_2 R_s$ .
- Si  $I_1 = I_2$ , entonces el voltaje de salida es cero. En General  $I_1$  no es totalmente igual a  $I_2$ , pero aún en este caso, el voltaje de error de salida se reduce de la manera descrita a continuación porque  $I_{OS}$  es menor que  $I_2$ .

$$V_{SAL(error)} = |I_1 - I_2| R_s = I_{OS} R_s$$

donde  $I_{OS}$  es el desequilibrio de corriente de entrada.

# Compensación de la corriente de polarización en otras configuraciones de amplificadores operacionales

- Para compensar el efecto de la corriente de polarización en el amplificador no inversor se agrega una resistencia  $R_c$  como se muestra en la figura 10-32(a).



- *Figura 10-32: Compensación del efecto de la corriente de polarización en las configuraciones de amplificador inversor y no inversor*

## Compensación de la corriente de polarización en otras configuraciones de amplificadores operacionales (Cont...)

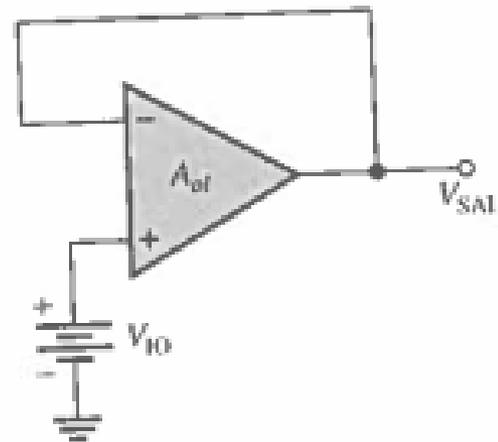
- El valor del resistor de compensación es igual a la combinación en paralelo de  $R_i$  y  $R_f$ .
- La corriente de entrada crea una caída de voltaje a través de  $R_c$  que compensa el voltaje a través de la combinación de  $R_i$  y  $R_f$ , por lo que el voltaje de error de salida se reduce.
- El amplificador inversor se compensa del mismo modo, como se muestra en la figura 10- 32(b)

## **Uso de un amplificador operacional de BIFET para eliminar la necesidad de compensar el efecto de la corriente de polarización**

- El amplificador operacional de BIFET utiliza transistores tanto BJT como JFET en sus circuitos internos.
- Los JFET se utiliza como dispositivos de entrada para obtener una impedancia de entrada más alta de lo que es posible con amplificadores de BJT estándar.
- Debido a su muy alta impedancia de entrada, los BIFET en general tienen corrientes de polarización de entrada mucho más pequeñas que en amplificadores operacionales de BJT, por lo que se reduce o elimina la necesidad de compensar el efecto de la corriente de polarización.

# Efecto del desequilibrio de voltaje de entrada

- El voltaje de salida de un op-amp deberá ser cero cuando la entrada diferencial sea cero, sin embargo, siempre existe un pequeño voltaje de error de salida cuyo valor en general del orden desde microvoltios hasta milivoltios. Esto se debe a los desequilibrios inevitables dentro de los transistores internos del op-amp además de las corrientes de polarización previamente analizadas.
- En una configuración de realimentación negativa, el desequilibrio de voltaje de entrada  $V_{IO}$  puede ser visualizado como una pequeña fuente de voltaje de **cd** equivalente, como se muestra en la figura 10-33 para un seguidor de voltaje.



**Figura 10-33**

*Equivalente de desequilibrio  
De voltaje de entrada*

## Efecto del desequilibrio de voltaje de entrada (Cont...)

- En general, el voltaje de error de salida producido por el desequilibrio de voltaje de entrada es:

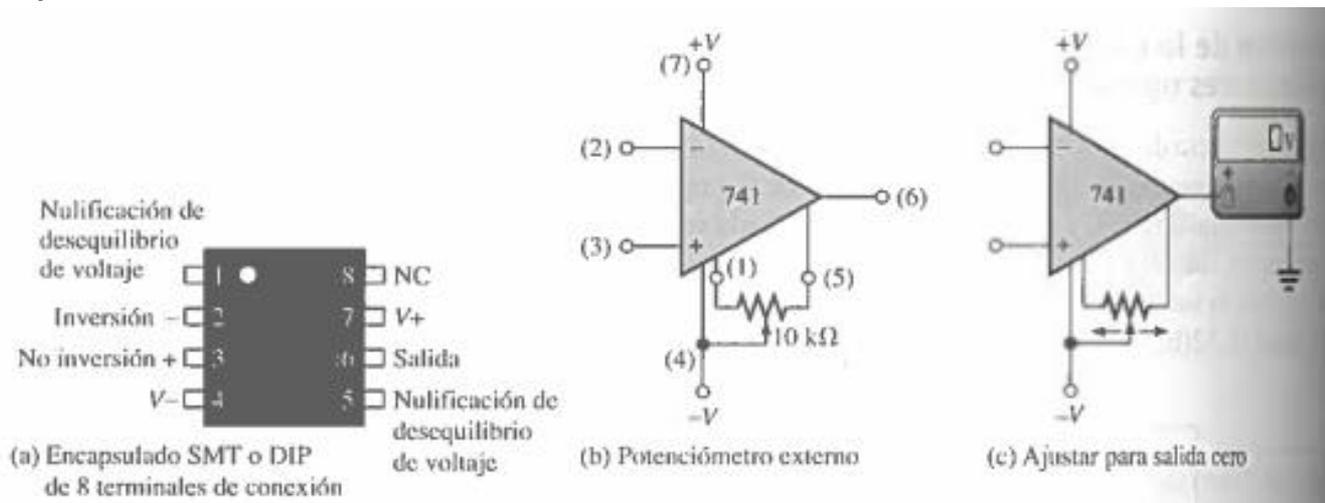
$$V_{SAL(error)} = Acl V_{IO}$$

En el caso del seguidor de voltaje,  $Acl = 1$ , por lo tanto

$$V_{SAL(error)} = V_{IO}$$

# Compensación del desequilibrio de voltaje de entrada

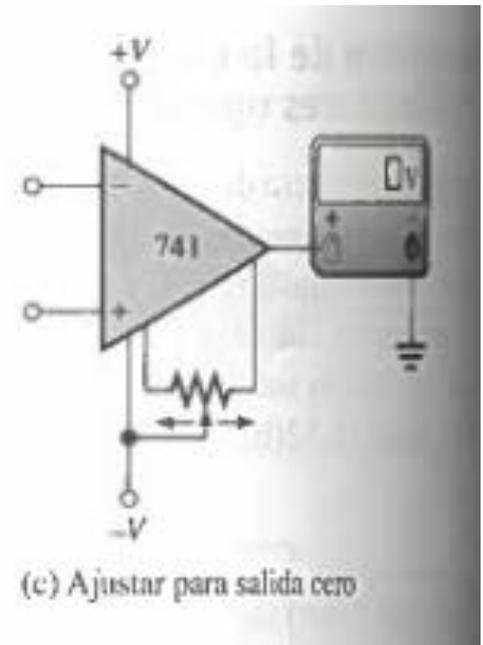
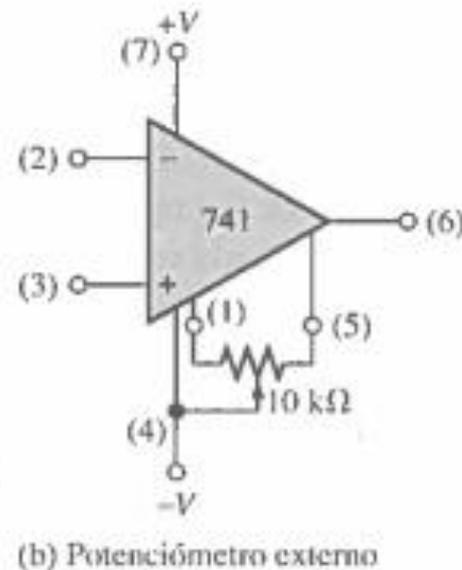
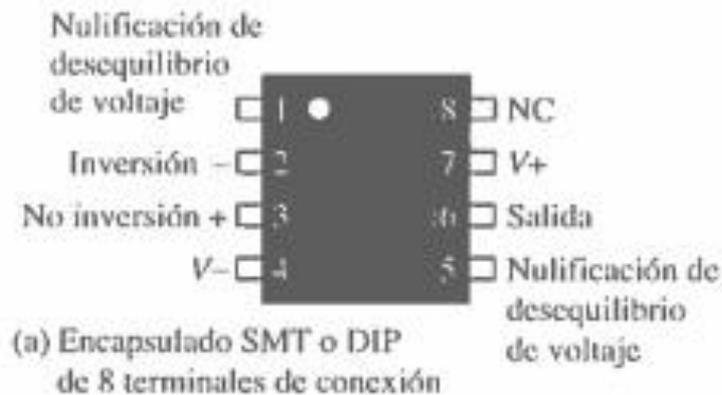
- La mayoría de los amplificadores operacionales en circuito integrado disponen de una forma de compensar el desequilibrio de voltaje, esto se realiza conectando un potenciómetro externo a puntas de conexión designadas en el encapsulado del circuito integrado como se muestra en las figuras 10-34(a) y (b) en el caso de un op-amp 741, las dos terminales están marcadas *compensación o nulificación del desequilibrio*.



**Fig. 10-24:** *Compensación del efecto del desequilibrio de voltaje de entrada de un op-amp 741*

# Compensación del desequilibrio de voltaje de entrada (cont...)

- Sin embargo, el potenciómetro simplemente se ajusta hasta que el voltaje de salida es 0 , como se muestra en la figura 10-34(c )



- **Fig. 10-34:** *Compensación del efecto del desequilibrio de voltaje de entrada de un op-amp 741*

# **CIRCUITOS BÁSICOS CON OP - AMPS**

# COMPARADORES

## Detección del nivel cero

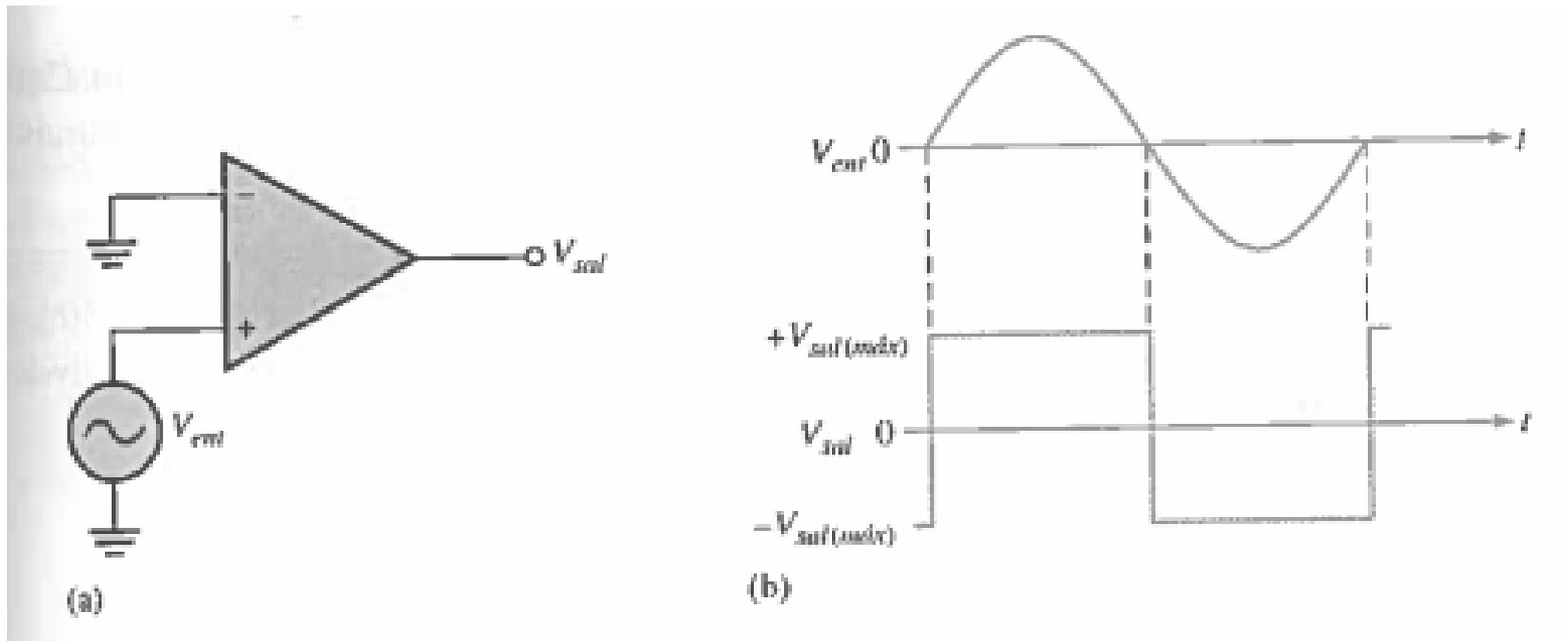


Fig. 10-35: El amplificador operacional como detector de nivel cero

# COMPARADORES (Cont...)

## Detección del nivel distinto de cero

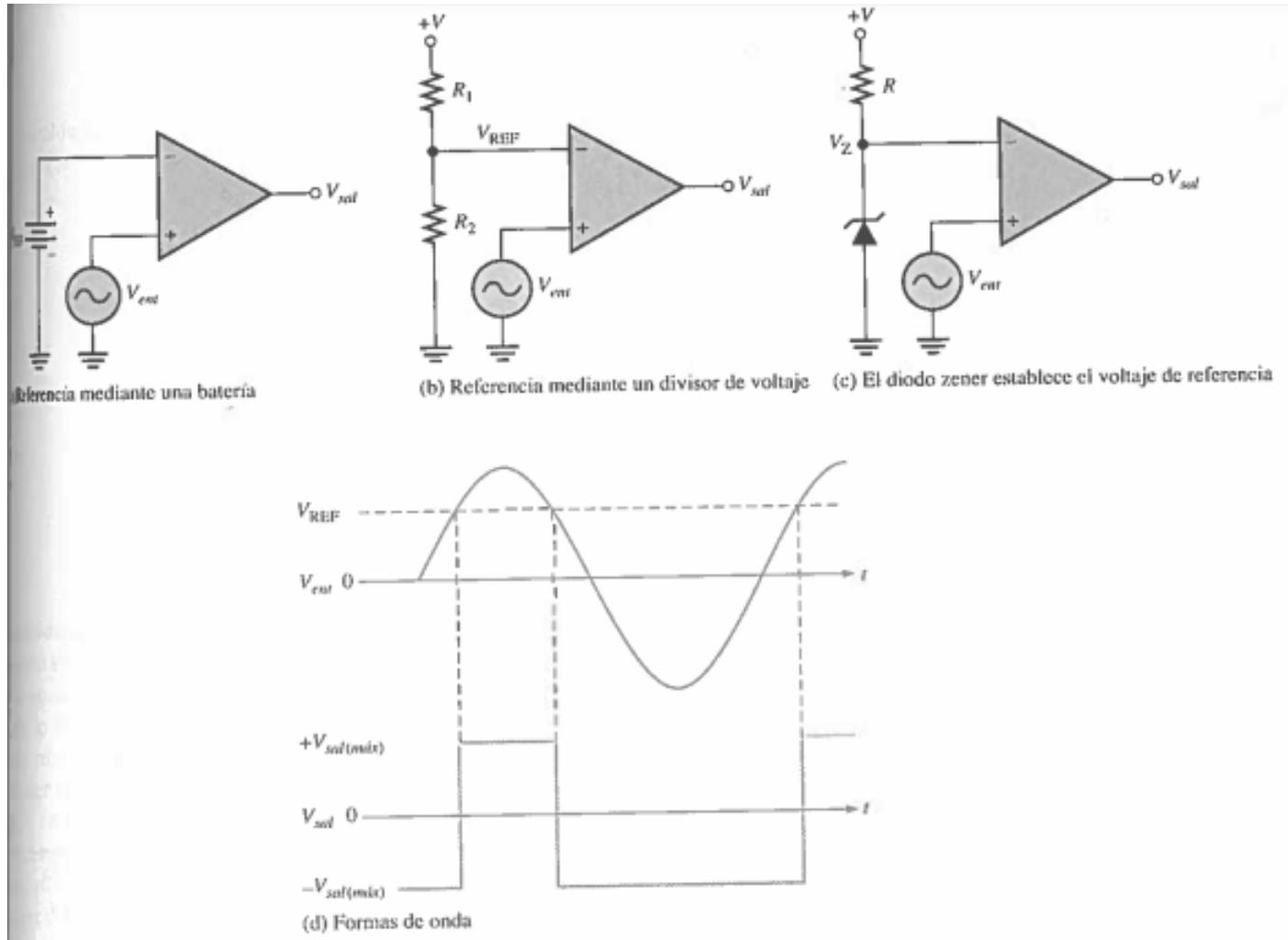
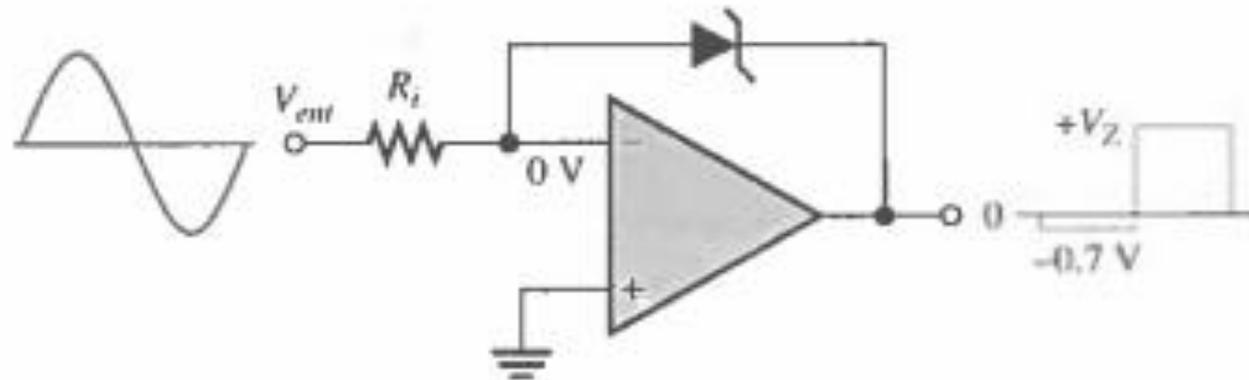
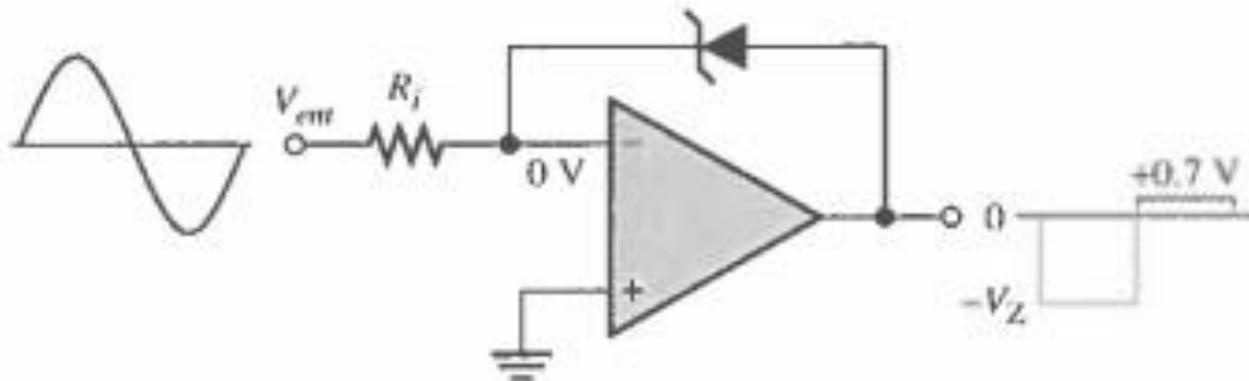


Fig. 10-36: Detectores de nivel distinto de cero

# Acotación de la salida de comparadores



(a) Acotado a un valor positivo



(b) Acotado a un valor negativo

Fig. 10-37: Operación de un comparador acotado

# Acotación de la salida de comparadores

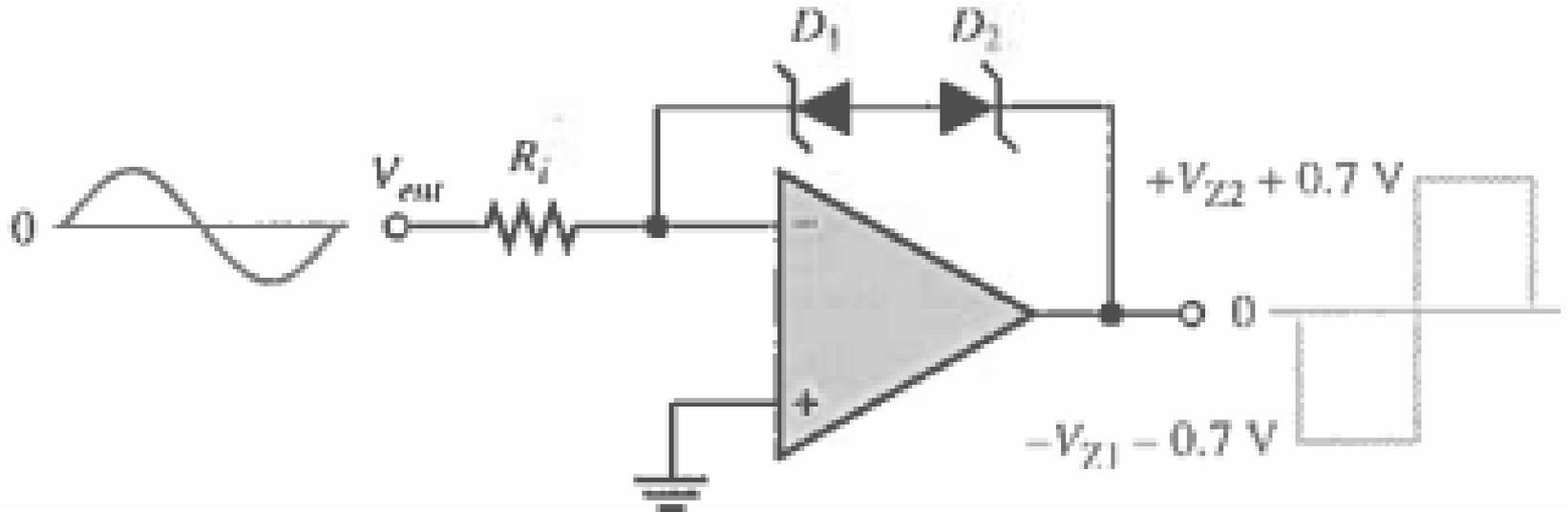


Fig. 10-38: Comparador doblemente acotado

# AMPLIFICADOR SUMADOR

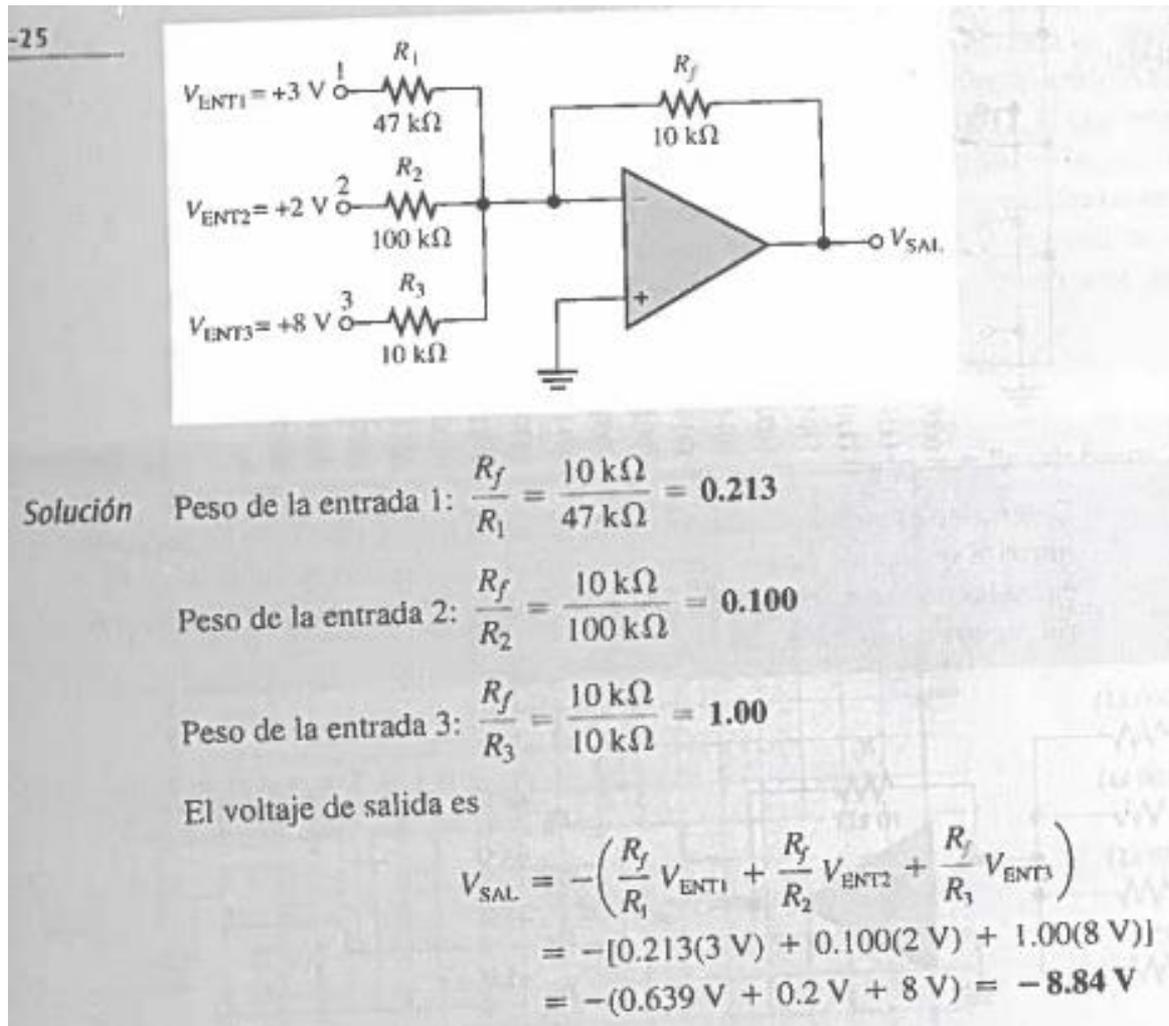


Fig. 10-39: Amplificador sumador

**F I N**