

# **APUNTE DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES**

Apunte de Amplificadores Operacionales  
Circuitos y Mediciones Electrónicas

## Tabla de contenido

Amplificadores Operacionales.....	1
Amplificador Operacional Ideal .....	1
Modos de un Amplificador Operacional .....	4
Modo Diferencial .....	4
Modo Común.....	5
Rechazo de Modo Común (CMRR) .....	5
Excursión máxima del voltaje de salida.....	7
ESPECIFICACIONES DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES; PARÁMETROS DE COMPENSACIÓN DE CC .....	8
Compensación de voltaje de entrada $V_{IO}$ .....	8
Compensación del desequilibrio de voltaje de entrada.....	9
Desequilibrio de voltaje de entrada.....	10
Desequilibrio de corriente de entrada .....	11
Impedancia de entrada.....	12
Impedancia de salida .....	12
Análisis de la ganancia del Amplificador Operacional.....	13
Limitaciones de ancho de banda .....	13
Ancho de banda en lazo abierto de 3 dB.....	14
Ancho de banda a ganancia unitaria .....	14
Análisis de ganancia versus frecuencia .....	15
Defasaje .....	16
Respuesta en frecuencia total .....	18
Respuesta en fase total .....	19
¿Por qué se utiliza realimentación negativa?.....	20
Ganancia de voltaje en lazo cerrado, <b><math>A_{cl}</math></b> .....	21
Amplificador no inversor .....	21
Seguidor de tensión.....	22
Amplificador inversor .....	23
Impedancias de un amplificador no inversor .....	25
Impedancia de entrada.....	25
Impedancia de salida .....	26
Impedancias del seguidor de voltaje.....	27

Apunte de Amplificadores Operacionales  
Circuitos y Mediciones Electrónicas

Impedancias de un amplificador inversor .....	27
Impedancia de entrada.....	27
Impedancia de salida .....	27
Efecto de la realimentación negativa en el ancho de banda .....	29
Producto de ganancia-ancho de banda.....	30

## Amplificadores Operacionales



El primer Amplificador Operacional operativo aparece en el año 1947 como parte de las primeras computadoras analógicas. Diseñado en base a válvulas electrónicas (tubos electrónicos).

En el 1964 apareció el primer amplificador como circuito integrado, fabricado por la empresa Fairchild Semiconductor, y llevó el número de modelo  $\mu$ A702.



Los amplificadores operacionales (AMPS-OP) actuales son dispositivos electrónicos perteneciente al grupo de los Circuitos Integrados Lineales. Operan con tensiones y corriente de **Corriente Continua** (CC) relativamente bajas. Son elementos de circuito baratos y confiables.

Si bien, los primeros amps-op se construyeron con el fin de ser utilizados para realizar operaciones matemáticas que se relacionaban la señal de salida con la de entrada, tales como:

- Adición
- Sustracción
- Derivación
- Integración

Con la llegada de los transistores integrados, comenzaron a ser utilizados en otras aplicaciones, a punto tal, que desde hace ya décadas el límite es la imaginación del diseñador.

## Amplificador Operacional Ideal

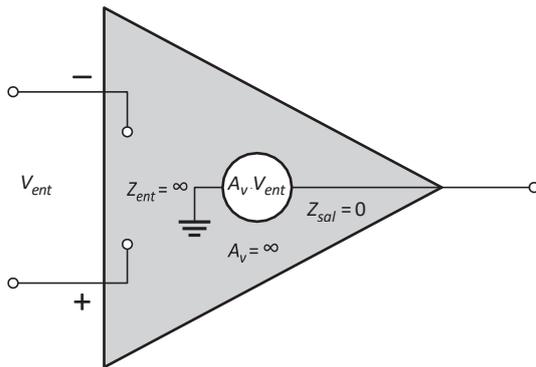
Como todo dispositivo tiene un modelo físico-circuitual que permite, a partir de parámetros y funciones, facilitar el diseño de sistemas y/o circuitos.

Comenzaremos con el **modelo ideal**.

Para detallar el Operacional ideal bastará con enumerar los siguientes puntos:

- ***Ganancia de voltaje infinita.***
- ***Ancho de banda infinito.***
- ***Impedancia de entrada infinita*** (no carga la fuente de excitación).
- ***Impedancia de salida cero.***
- ***Cero consumo de potencia.***

La representación del amps-op ideal se muestra en la figura 1.1



#### **Atributos del AMPS-OP Ideal**

- **Ganancia diferencial infinita.**
- **Ganancia de modo común cero.**
- **Voltaje de offset cero.**
- **Corriente de polarización cero.**
- **Ancho de banda infinito.**

#### **Atributos del AMPS-OP de Entrada**

- **Impedancia de entrada infinita.**
- **Corriente de polarización.**
- **Respuesta a voltajes diferenciales.**
- **Respuesta nula a voltajes de modo común.**

#### **Atributos del AMPS-OP de Salida**

- **Impedancia de salida cero**

La tensión  $V_{ent}$ , es aplicada a los terminales de entrada, siendo la tensión de salida  $A_v \cdot V_{ent}$

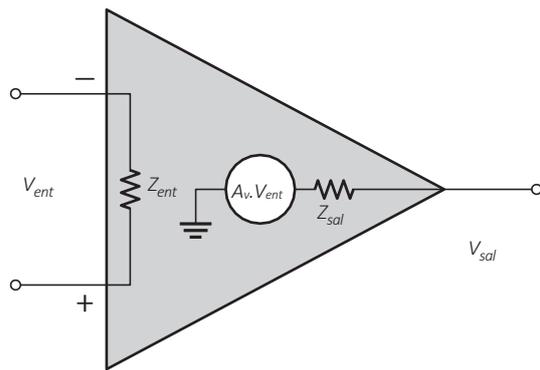
El amplificador operacional construido en un circuito integrado tiene limitaciones, como cualquier dispositivo. **Nunca se ha podido fabricar un dispositivo ideal, aun cuando en muchos casos, los amps-op comerciales pueden ser tratados como ideales.**

Los amplificadores operacionales tienen tanto **limitaciones de voltaje como de corriente**. El voltaje de salida depende de la **tensión de alimentación**. La corriente de salida está limitada por la **disipación de potencia y los valores nominales de los componentes**.

Las características de un amplificador operacional práctico son:

- **Ganancia de voltaje muy alta.**
- **Impedancia de entrada muy alta.**
- **Impedancia de salida muy baja.**

La representación del amps-op práctico se muestra en la figura:

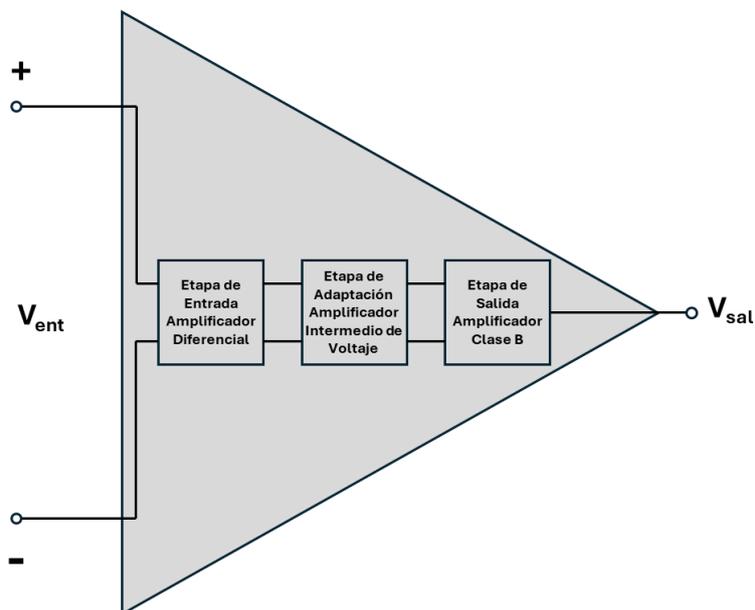


### Amplificador Operacional típico

Un amplificador operacional típico se compone de tres etapas identificables:

- *amplificador diferencial*. Amplifica la diferencia entre voltajes de entrada.
- *amplificador clase A*. Etapa intermedia de adaptación y ganancia adicional.
- *Amplificador clase B*. Etapa de salida que entrega potencia a la salida.

Etapas internas de un Amplificador Operacional.



## Modos de un Amplificador Operacional

En un AMPS-OP el modo está determinado por la entrada:

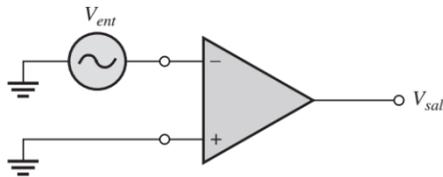
### Modo Diferencial

En este modo, se utiliza:

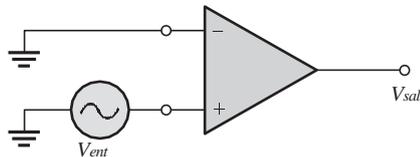
- Una señal se aplica a una entrada del AMPS-OP, mientras que la otra entrada del AMPS-OP es conectada a tierra.
- Se aplican dos señales de polaridad opuesta a las entradas de AMPS-OP.

Con un solo terminal, una entrada se conecta a tierra mientras que en la otra entrada es excitada por un voltaje de señal. Puede darse dos casos:

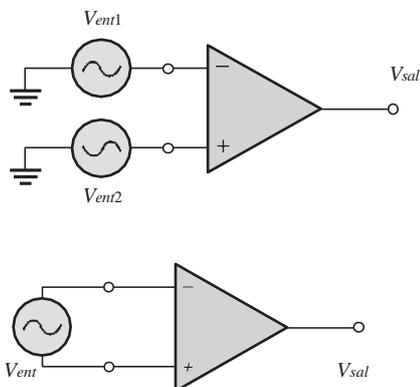
1. **La entrada inversora es utilizada como entrada de señal**, en esta disposición, aparecerá **una señal de salida amplificada e invertida**.



2. **La entrada no inversora es utilizada como entrada de señal**, ahora **aparecerá una señal de salida amplificada y no invertida**.



En el modo diferencial de dos terminales se aplican dos señales de polaridad opuesta (desfasadas) a las entradas, como muestra la figura que sigue. La señal de salida del AMPS-OP amplificada es la diferencia de las señales de entrada.

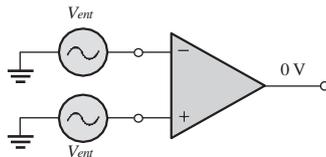


## Modo Común

**En modo común**, se aplican voltajes de señal a las dos entradas con la misma:

- **Fase.**
- **Frecuencia.**
- **Amplitud.**

**Cuando se aplican señales de entrada iguales a ambas entradas, tienden a cancelarse y el resultado es un voltaje de salida cero.**



## Rechazo de Modo Común (CMRR)

Lo mencionado, 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. Rechazo En Modo Común significa que esta señal indeseada no aparecerá en la salida y no 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, la línea de transmisión de 50 Hz u otras fuentes.

Lo dicho es solo para amplificadores ideales. **En los Amplificadores Operacionales reales esta es una característica de mérito**. Obedece, a que dicho tipo de excitaciones (señales de igual **Amplitud, Frecuencia y Fase**) **se corresponde en general, con voltajes externos como el ruido**. No es deseable que dichas señales espurias aparezcan a la salida.

La medida de la habilidad de un amplificador de rechazar señales en modo común es un parámetro llamado **Rechazo En Modo Común o CMRR (Common Mode Rejection Ratio)**.

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, presentan **una muy pequeña ganancia en modo común** (normalmente menor que 1), **al mismo tiempo que proporcionan una alta ganancia de voltaje diferencial en lazo abierto** (general de varios miles).

**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.**

Una buena medida del desempeño del amplificador operacional al rechazar señales en modo común indeseadas es **el cociente de la ganancia de voltaje diferencial en lazo abierto,  $A_{ol}$  y la ganancia en modo común,  $A_{cm}$** . Esta razón es el rechazo en modo común,  $CMRR$ .

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

**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 ( $dB$ ) como:

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

La ganancia de voltaje de lazo abierto  $A_{ol}$  de un amplificador operacional que representada por:

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

Esta es la ganancia de tensión cuando no hay componentes externos al dispositivo y queda determina por el diseño del CI del amps-op.

La ganancia de voltaje en lazo abierto puede llegar 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.**

OPEN-LOOP GAIN						
$A_{OL}$	Open-loop voltage gain	$V_S = 15\text{ V}; V_O = 1\text{ V to }11\text{ V}; R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ , connected to (V-)		70	140	V/mV
			$T_A = -40^\circ\text{C to }+85^\circ\text{C}$	35		V/mV

Ver que la relación es  $\frac{V}{mV} = \frac{V}{10^{-3}V} = 10^3$

La ganancia calculada es de  $140 \times 10^3 = 140000$

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)**. Si las amplitudes de la señal de entrada diferencial y el ruido en modo común **son iguales**, la señal deseada aparecerá a la salida 100,000 veces más grande que el ruido.

**De este modo, el ruido o interferencia ha sido en esencia eliminada.**

### Excursión máxima del voltaje de salida

Si consideramos la señal de salida de un AMPS-OP sin señal a la entrada, podría considerarse que el valor será de cero voltios. Este voltaje se conoce como **voltaje de salida del punto de operación**.

Con una señal aplicada distinta de cero la excursión de la **señal de salida de pico a pico** ( $V_{o(p-p)}$ ) no puede ser mayor que  $\pm V_{CC}$ , considerando ( $|V_{CC}| = |V_{EE}|$ ), este valor nunca podrá ser alcanzado.

$V_{o(p-p)}$  varía con la carga conectada al amplificador operacional.

## ESPECIFICACIONES DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES; PARÁMETROS DE COMPENSACIÓN DE CC

Antes de seguir con varias aplicaciones prácticas que utilizan amplificadores operacionales, debemos habituarnos con algunos de los parámetros utilizados para definir la operación de la unidad.

**Estas especificaciones incluyen tanto características de operación de CC como transitorias o de frecuencia, como veremos a continuación**

Aun cuando la salida de un amplificador operacional debe ser de **0V** cuando la entrada es de **0V**, en la operación real se presenta una compensación de voltaje a la salida. Por ejemplo, si se conectan **0V** a ambas entradas del amplificador operacional y luego se leen **26 mV(CC)** a la salida, **esto representaría 26 mV de voltaje no deseado generado por el circuito y no por la señal de entrada.**

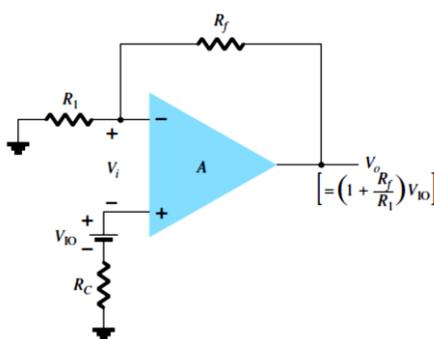
Se puede demostrar que dos condiciones distintas en el circuito afectan la compensación de voltaje de salida:

1. Una compensación de voltaje de entrada  $V_{IO}$ .
2. Una compensación de corriente debido a la diferencia de las corrientes resultantes en las entradas (+) y (-).

### Compensación de voltaje de entrada $V_{IO}$

La hoja de especificaciones del fabricante da un valor de  $V_{IO}$  para el amplificador operacional.

Para determinar el efecto de este voltaje de entrada en la salida, considere la conexión mostrada en la figura. Utilizando  $V_o = AV_i$  podemos escribir:



$$V_o = A \cdot V_i = A \left( V_{IO} - V_o \frac{R_i}{R_i + R_f} \right)$$

Resolviendo para  $V_o$ , obtenemos

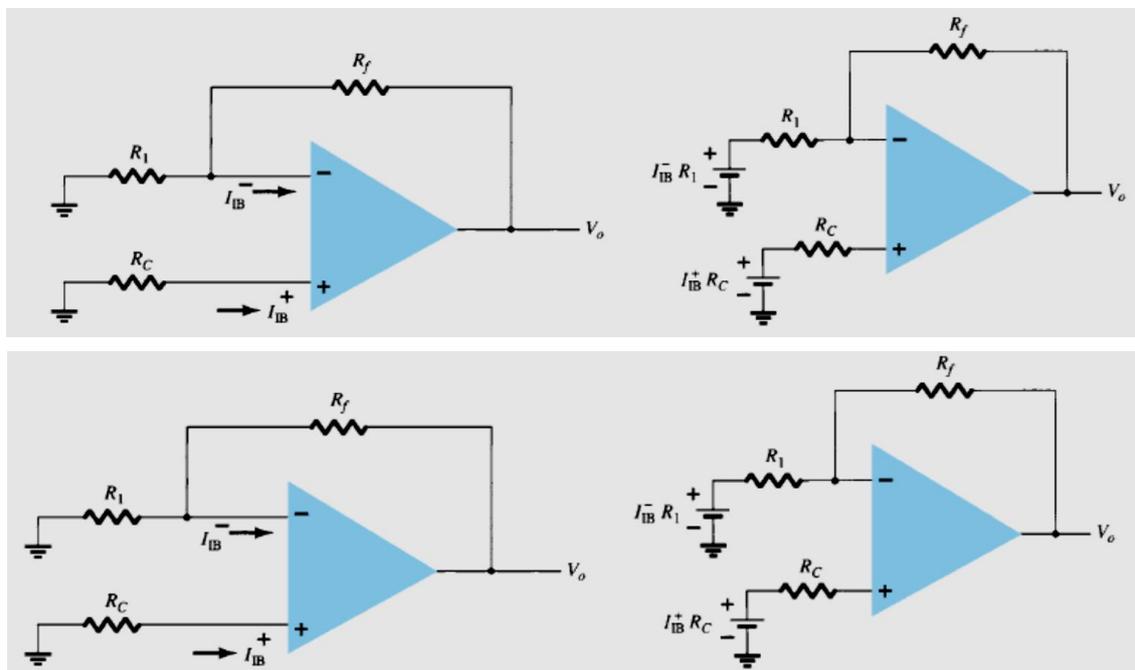
$$V_o = V_{IO} \frac{A}{1 + A \left[ \frac{R_i}{R_i + R_f} \right]} \approx V_{IO} \frac{A}{A \left[ \frac{R_i}{R_i + R_f} \right]}$$

por lo que podemos escribir

$$V_{O(Compensación)} = V_{IO} \frac{R_i + R_f}{R_i}$$

La ecuación muestra cómo se obtiene una compensación de voltaje de salida con una compensación de voltaje de entrada especificado para una conexión de amplificador típica del amplificador operacional.

*Compensación de voltaje de salida debido a la compensación de corriente de entrada*



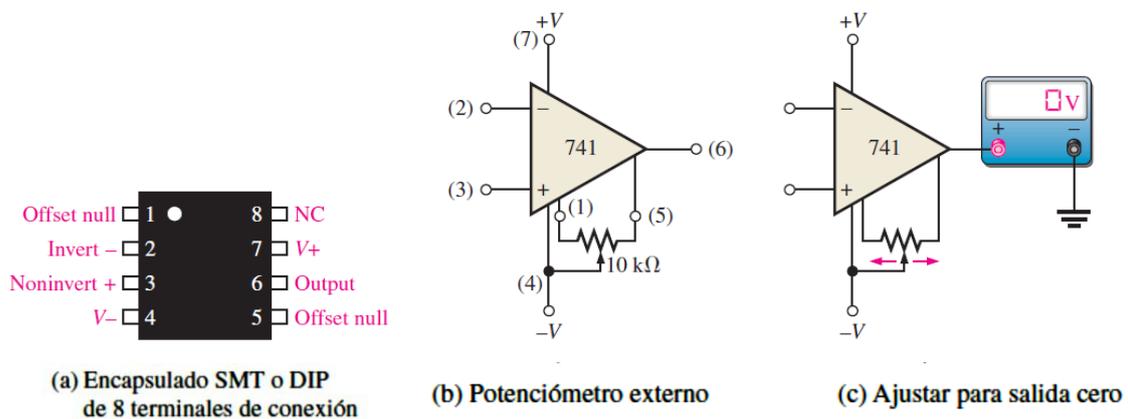
También se obtendrá una compensación de voltaje de salida a consecuencia de cualquier diferencia en las corrientes de polarización de CC en ambas entradas. Como los dos transistores de entrada nunca coinciden con exactitud, cada uno operará con una corriente ligeramente diferente. Para una conexión de amplificador operacional típica, como la de la figura, se puede determinar una compensación de voltaje de salida como sigue. **Si reemplazamos las corrientes de polarización que fluyen a través de los resistores de entrada por la caída de voltaje que cada una desarrolla como se muestra, podemos determinar la expresión para la compensación de voltaje**

*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 en general se realiza conectando un potenciómetro externo a puntas de conexión designadas en el encapsulado del circuito integrado, como se ilustra en las figuras (a) y (b) en el caso de un amplificador operacional 741. Las dos terminales están marcadas **compensación o nulificación del desequilibrio**. **Sin entrada**, el potenciómetro simplemente se ajusta hasta que el voltaje de salida es 0, como muestra la figura (c).

### Desequilibrio de voltaje de entrada

El amplificador operacional ideal produce cero volts de salida por cero volts de entrada. En un amplificador operacional práctico, sin embargo, aparece un pequeño cambio de CC,  $V_{SAL(error)}$  a la salida cuando no se aplica voltaje de entrada diferencial. Como se especifica en la hoja de datos de un amplificador operacional, el **desequilibrio de voltaje de entrada**  $V_{OS}$ , es el voltaje de CC diferencial requerido entre las entradas para forzar la salida a cero volts. Los valores típicos del desequilibrio de voltaje de entrada se encuentran en el intervalo **de 2 mV o menos**.



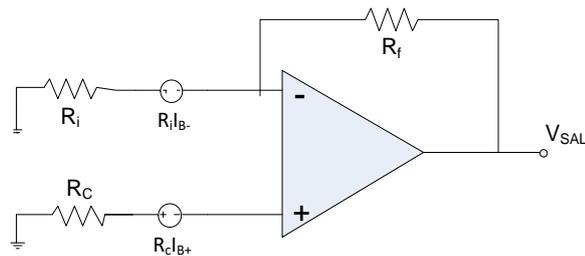
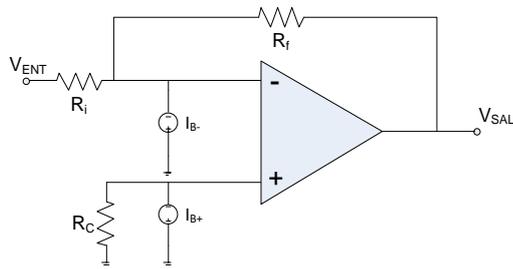
**En el caso ideal, es de 0 V.**

**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.**

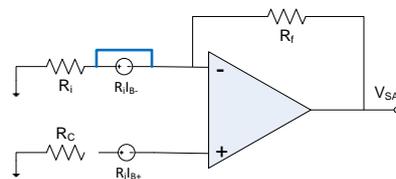
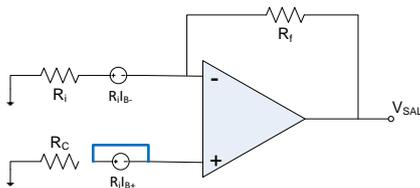
**Los valores típicos varían entre aproximadamente 5  $\mu$ V por grado  $^{\circ}$ C hasta aproximadamente 50  $\mu$ V por  $^{\circ}$ C.**

## Desequilibrio de corriente de entrada

Cálculo realizado considerando que ambas corrientes de entrada son iguales  $I_B^+ = I_B^-$



$$V_{SAL} = V_{SAL}^- + V_{SAL}^+$$



$$V_{SAL} = (-R_C \cdot I_B^+) \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) - (-R_i \cdot I_B^-) \cdot \left(-\frac{R_f}{R_i}\right)$$

Dado que:  $I_B^+ \cong I_B^-$

$$0v = R_C \cdot I_B^- \cdot \frac{R_f}{R_i} - R_C \cdot I_B^+ \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

$$0v = I_B \left[ R_f - R_C \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) \right]$$

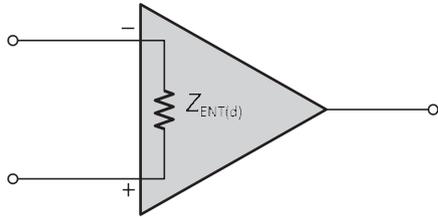
$$R_f = R_C \cdot \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right)$$

$$R_C = \frac{R_f \cdot R_i}{R_f + R_i}$$

### Impedancia de entrada

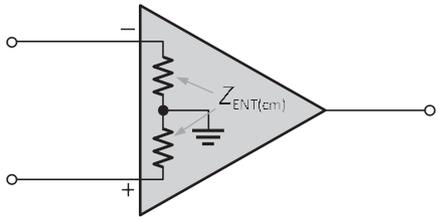
#### Impedancia de entrada en un AMPS-OP

La **Impedancia de entrada diferencial** es la resistencia total entre las entradas inversora y no inversora, como ilustra la figura



(a) Impedancia de entrada diferencial

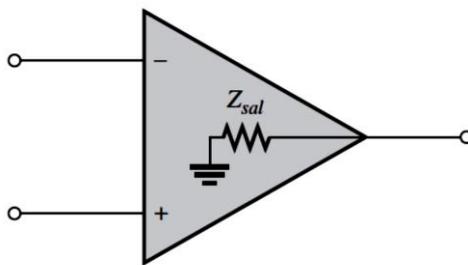
La **impedancia de entrada en modo común** es la resistencia entre cada entrada y tierra. Se ilustra en la figura.



(b) Impedancia de entrada en modo común

### Impedancia de salida

La **impedancia de salida** es la resistencia vista desde la terminal de salida del amplificador operacional, como indica la figura

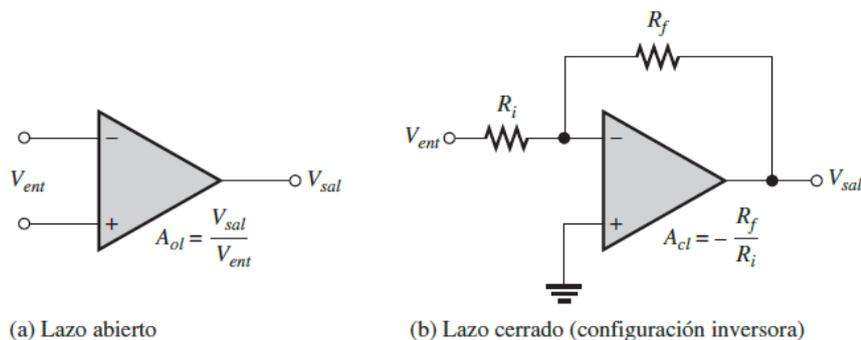


## Análisis de la ganancia del Amplificador Operacional

Como ya vimos, hay dos ganancias de tensión a considerar en los AMPS-OP:

- La ganancia de voltaje de 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**. Figura (a)
- La ganancia de voltaje de lazo cerrado ( $A_{cl}$ ), es **la ganancia de voltaje de un amplificador operacional con realimentación externa**.

Con los valores de los componentes externos se puede controlar con precisión la ganancia de voltaje en lazo cerrado.

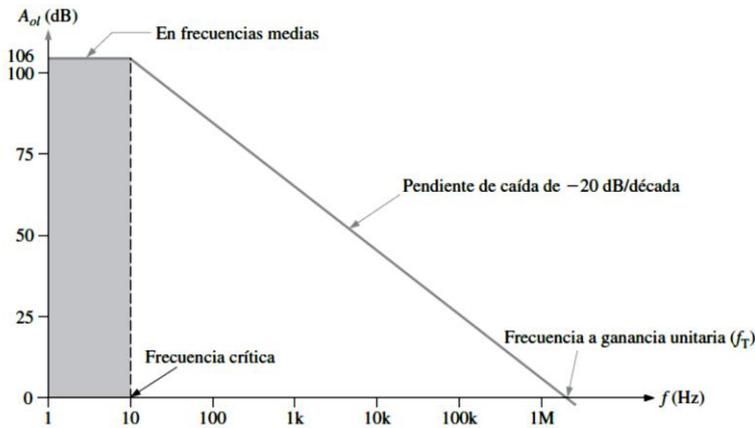


### Limitaciones de ancho de banda

En las secciones previas, todas las expresiones para ganancia de voltaje se basaron en la **ganancia en frecuencias medias** y **se consideraron**

**independientes de la frecuencia**. La ganancia en lazo abierto en frecuencias medias de un amplificador operacional se extiende desde una frecuencia cero (CC) hasta una frecuencia crítica la cual la ganancia es 3 dB menor que el valor en frecuencia media. Dado que, son amplificadores de CC (sin acoplamiento capacitivo entre las etapas) por consiguiente, no existe frecuencia crítica inferior. **Esto significa que la ganancia en frecuencias medias se extiende hasta una frecuencia cero (CC) y los voltajes de CC se amplifican lo mismo que las frecuencias de señal en frecuencias medias.**

**La Respuesta en Frecuencia, es la respuesta de un sistema en régimen permanente ante una entrada sinusoidal**



En la figura se muestra una curva de respuesta en lazo abierto (traza de Bode) de cierto amplificador operacional. La mayoría de las hojas de datos de amplificadores operacionales muestran este tipo de curva o especifican la ganancia en lazo abierto en

frecuencias medias. Observe que la curva se reduce a -20 dB por década (-6 dB por octava). La ganancia en frecuencias medias es de 200,000, la cual corresponde a 106 dB y la frecuencia crítica (de corte) es aproximadamente de 10 Hz.

#### Ancho de banda en lazo abierto de 3 dB

El ancho de banda de un amplificador de CA es el intervalo de frecuencia entre los puntos donde la ganancia es 3 dB menor que la ganancia en frecuencias medias. En general, el ancho de banda es igual a la frecuencia crítica superior ( $f_{cu}$ ) menos la frecuencia crítica inferior ( $f_{cl}$ )

$$BW = (f_{cu}) - (f_{cl})$$

Como  $f_{cl}$  para un amplificador operacional es cero, el ancho de banda es simplemente igual a la frecuencia crítica superior.

$$BW = (f_{cu})$$

De aquí en adelante se hará referencia a  $f_{cu}$  simplemente como  $f_c$ ; y se utilizarán las designaciones en lazo abierto ( $ol$ ) o en lazo cerrado ( $cl$ ), por ejemplo,  $f_{c(ol)}$ .

#### Ancho de banda a ganancia unitaria

Observe que la ganancia se reduce de forma constante hasta un punto donde es igual a la unidad (1 o 0 dB). El valor de la frecuencia a la cual esta ganancia unitaria ocurre es la frecuencia a ganancia unitaria designada  $f_T$ .

**$f_T$  se considera por lo mencionado anteriormente coincidente con el ancho de banda a ganancia unitaria.**

### Análisis de ganancia versus frecuencia

Los circuitos RC de atraso (pasa bajos) dentro de un amplificador operacional son responsables de la reducción gradual de la ganancia a medida que se incrementa la frecuencia, tal como se describió para los amplificadores discretos. De acuerdo con la teoría básica de circuitos de CA, la atenuación de un circuito RC de atraso, como el de la figura se expresa como:

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Operando

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{X_C}{\sqrt{1 + R^2/X_C^2}}$$

La frecuencia crítica para este circuito ocurre cuando  $X_C = R$  :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\frac{f_c}{f} = \frac{1}{2\pi RCf} = \frac{1}{(2\pi fC)R}$$

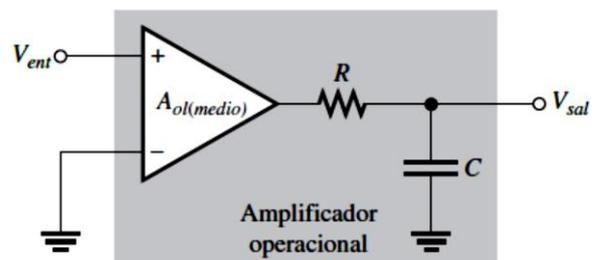
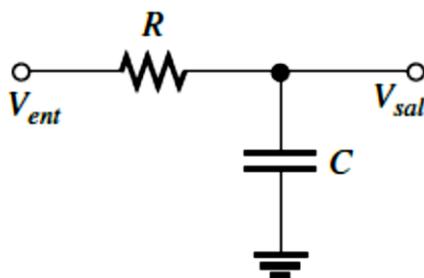
Con lo cual:

$$\frac{f_c}{f} = \frac{X_C}{R}$$

Sustituyendo el resultado de la anterior ecuación por  $V_{sal} / V_{ent}$ , se produce la siguiente expresión para la atenuación del circuito RC de atraso en términos de la frecuencia:

$$\frac{V_{sal}}{V_{ent}} = \frac{1}{\sqrt{1 + f^2/f_c^2}}$$

Si un amplificador operacional es representado por un elemento de ganancia de voltaje, con una ganancia de  $A_{ol(medio)}$  más un circuito simple RC de atraso como muestra la figura, se conoce como **amplificador operacional compensado**. La ganancia total en lazo abierto del amplificador operacional es el producto de la **ganancia en lazo abierto en frecuencias medias**,  $A_{ol(medio)}$ , y la atenuación del circuito RC de atraso.



**EJEMPLO:**

Determine  $A_{ol}$  con los siguientes valores de  $f$ . Considere  $f_{c(ol)} = 100\text{Hz}$  y  $A_{ol(\text{medio})} = 100.000$

- (a)  $f = 0\text{ Hz}$  (b)  $f = 10\text{ Hz}$  (c)  $f = 100\text{ Hz}$  (d)  $f = 1000\text{ Hz}$

**SOLUCIÓN:**

$$(a) A_{ol} = \frac{A_{ol(\text{medio})}}{\sqrt{1+f^2/f_c^2}} = A_{ol} = \frac{100.000}{\sqrt{1+0}} = 100.000$$

$$(b) A_{ol} = \frac{A_{ol(\text{medio})}}{\sqrt{1+f^2/f_c^2}} = A_{ol} = \frac{100.000}{\sqrt{1+(0,1)^2}} = 99.503$$

$$(c) A_{ol} = \frac{A_{ol(\text{medio})}}{\sqrt{1+f^2/f_c^2}} = A_{ol} = \frac{100.000}{\sqrt{1+(1)^2}} = \frac{100.00}{\sqrt{2}} = 70.710$$

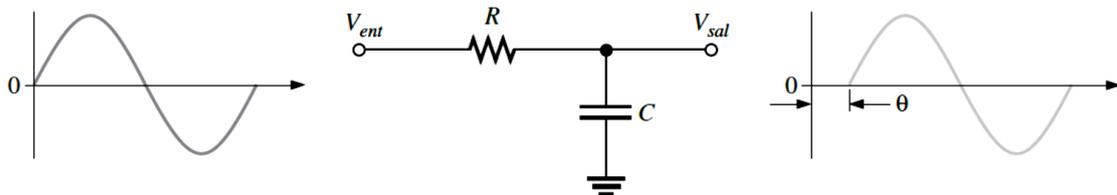
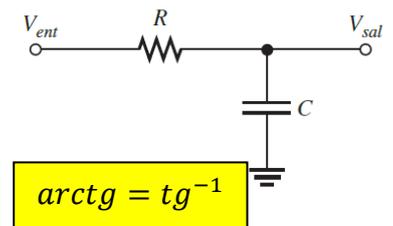
$$(d) A_{ol} = \frac{A_{ol(\text{medio})}}{\sqrt{1+f^2/f_c^2}} = A_{ol} = \frac{100.000}{\sqrt{1+(10)^2}} = 9.950$$

frecuencias medias cuando la frecuencia de la señal  $f$  es mucho menor que la frecuencia crítica  $f_c$  y se reduce a medida que la frecuencia se incrementa. Como  $f_c$  es una parte de la respuesta en lazo abierto de un amplificador operacional, se hará referencia a ella como  $f_{c(ol)}$

## Defasaje

Un circuito RC ocasiona un retardo de propagación de la entrada a la salida, por lo que se produce un **desfasamiento** entre la señal de entrada y la señal de salida.

Un circuito RC de atraso tal como el encontrado en una etapa del amplificador operacional hace que el voltaje de la señal de salida atrase la entrada, como muestra la figura a la derecha. De acuerdo con la teoría de circuitos de CA, el desfase  $\theta$  es



$$\theta = -\arctg \frac{R}{X_C}$$

Dado que:  $R/X_C = f/f_c$

$$\theta = -\arctg \frac{f}{f_c}$$

El signo negativo indica que la salida atrasa la entrada. Esta ecuación muestra que el desfase se incrementa con la frecuencia y tiende a  $-90^\circ$  a medida que la frecuencia llega a ser mucho más grande que  $f_c$ .

**EJEMPLO:**

Calcule el desfaseamiento con un circuito *RC* de atraso a cada de las siguientes frecuencias y luego trace la curva de fase contra la frecuencia. Suponga que  $f_c = 100 \text{ Hz}$ .

- (a)  $f = 1 \text{ Hz}$  (b)  $f = 10 \text{ Hz}$  (c)  $f = 100 \text{ Hz}$   
 (d)  $f = 1000 \text{ Hz}$  (e)  $f = 10,000 \text{ Hz}$

**SOLUCIÓN:**

(a)  $\theta = -\arctg \frac{f}{f_c} = -\arctg \frac{1\text{Hz}}{100\text{Hz}} = -0,573^\circ$

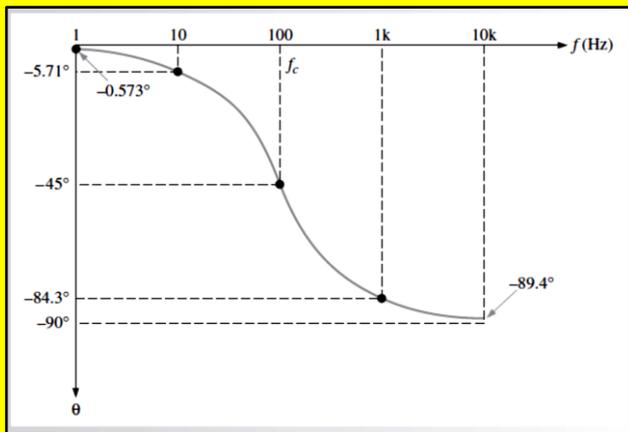
(b)  $\theta = -\arctg \frac{f}{f_c} = -\arctg \frac{10\text{Hz}}{100\text{Hz}} = -5,71^\circ$

(c)  $\theta = -\arctg \frac{f}{f_c} = -\arctg \frac{100\text{Hz}}{100\text{Hz}} = -45^\circ$

(d)  $\theta = -\arctg \frac{f}{f_c} = -\arctg \frac{1000\text{Hz}}{100\text{Hz}} = -84,3^\circ$

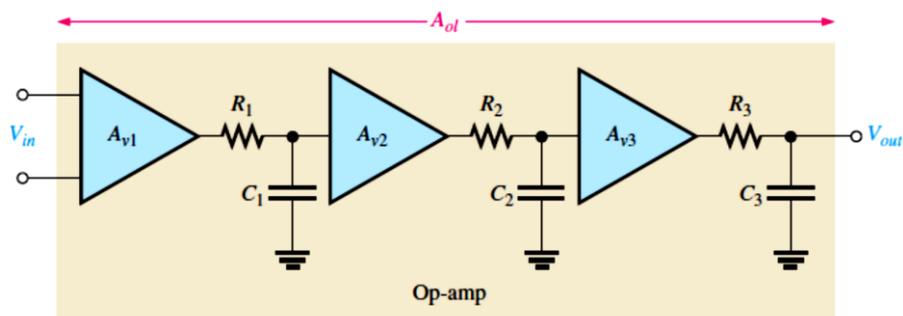
(e)  $\theta = -\arctg \frac{f}{f_c} = -\arctg \frac{10000\text{Hz}}{100\text{Hz}} = -89,4^\circ$

La curva de fase contra frecuencia aparece en la figura 12-40. Observe que el eje de frecuencia es logarítmico.

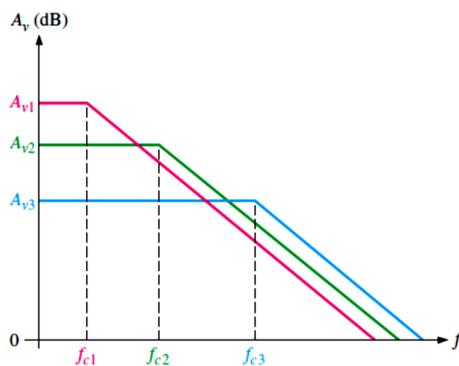


## Respuesta en frecuencia total

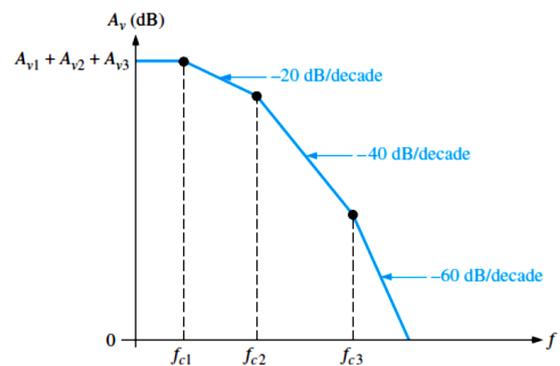
Previamente se definió que un amplificador operacional tiene una reducción gradual constante de  $-20 \text{ dB/década}$  por encima de su frecuencia crítica. Para la mayoría de los amplificadores operacionales éste es el caso; para algunos, sin embargo, la situación es más compleja. El amplificador operacional de circuito integrado más complejo puede consistir en dos o más etapas de amplificador conectadas en cascada. La ganancia de cada etapa depende de la frecuencia y se reduce a  $-20 \text{ dB/década}$  por encima de su frecuencia crítica. Por consiguiente, la respuesta total de un amplificador operacional es una combinación de las respuestas individuales de las etapas internas. Como un ejemplo, un amplificador operacional de tres etapas está representado en la figura (a) y la respuesta a la frecuencia de cada etapa se muestra en la figura (b). Como se sabe, se suman las ganancias en dB de modo que la respuesta en frecuencia total de un amplificador operacional es como muestra la figura (c). Como las pendientes de caída son aditivas, la pendiente de caída total se incrementa en  $-20 \text{ dB/década}$  ( $-6 \text{ dB/década}$ ) a medida que se alcanza cada frecuencia crítica.



(a) Representación de un amplificador operacional con tres etapas internas



(b) Respuestas individuales



(c) Respuesta compuesta

## Respuesta en fase total

En un amplificador de etapas múltiples, cada etapa contribuye al desfase total. Como se ha visto, cada circuito **RC** de atraso es capaz de producir hasta  $-90^\circ$  de desfase. Como cada etapa en un amplificador operacional incluye un circuito **RC** de atraso, un amplificador operacional de tres etapas, por ejemplo, puede tener un desfase máximo de  $-270^\circ$ . Además:

- El desfase de cada etapa **es menor que**  $-45^\circ$  cuando la frecuencia se encuentra por debajo de la frecuencia crítica
- **Igual a**  $-45^\circ$  a la frecuencia crítica
- **Mayor que**  $-45^\circ$  cuando la frecuencia se encuentra por encima de la frecuencia crítica.

Los desfases de las etapas de un amplificador operacional se suman para producir un desfase total, de acuerdo con la fórmula siguiente para tres etapas:

$$\theta_{tot} = -\arctg \frac{f}{f_{c1}} - -\arctg \frac{f}{f_{c2}} - -\arctg \frac{f}{f_{c3}}$$

### **EJEMPLO:**

**Cierto amplificador operacional tiene tres etapas internas de amplificador con las siguientes ganancias y frecuencias críticas:**

$$\text{Etapa 1: } A_{v1} = 40\text{dB}, f_{c1} = 2\text{ KHz}$$

$$\text{Etapa 2: } A_{v2} = 32\text{dB}, f_{c2} = 40\text{ KHz}$$

$$\text{Etapa 3: } A_{v3} = 20\text{dB}, f_{c3} = 150\text{ KHz}$$

**Determine la ganancia en frecuencias medias en lazo abierto en decibels y el desfase total cuando  $f = f_{c1}$ .**

### **SOLUCIÓN:**

$$A_{ol(\text{medio})} = A_{v1} + A_{v2} + A_{v3} = 40\text{ dB} + 32\text{ dB} + 20\text{ dB} = 92\text{ dB}$$

$$\theta_{tot} = -\arctg \frac{f}{f_{c1}} - -\arctg \frac{f}{f_{c2}} - -\arctg \frac{f}{f_{c3}} =$$

$$\theta_{tot} = -\arctg \frac{2\text{KHz}}{2\text{KHz}} - -\arctg \frac{2\text{KHz}}{40\text{KHz}} - -\arctg \frac{2\text{KHz}}{150\text{KHz}} =$$

$$\theta_{tot} = -45^\circ - 2,86^\circ - 0,76^\circ = -48,6^\circ$$

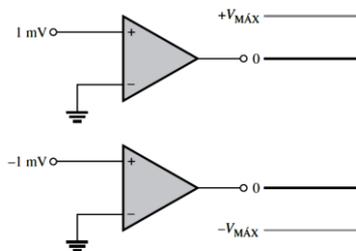
## ¿Por qué se utiliza realimentación negativa?

La ganancia de voltaje en lazo abierto propia 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.

En realidad, incluso el **desequilibrio de voltaje de entrada** del amps-op puede llevarlo al estado de saturación. Por ejemplo, si  $V_{ENT} = 1mV$  y  $A_{ol} = 100,000$ . Entonces:

$$V_{ENT} \cdot A_{ol} = 1mV \cdot 100.000 = 100V$$

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



**La utilidad de un amplificador operacional 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, salida y el ancho de banda del amplificador. La tabla resume los efectos generales de la realimentación negativa en el desempeño de un amplificador operacional.

	GANANCIA DE VOLTAJE	Z DE ENTRADA	Z DE SALIDA	ANCHO DE BANDA
Sin realimentación negativa	$A_{ol}$ es demasiada alta para aplicaciones de amplificador lineal	Relativamente alta (consulte la tabla 12-1)	Relativamente baja	Relativamente angosto (porque la ganancia es muy alta)
Con realimentación negativa	$A_{cl}$ 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

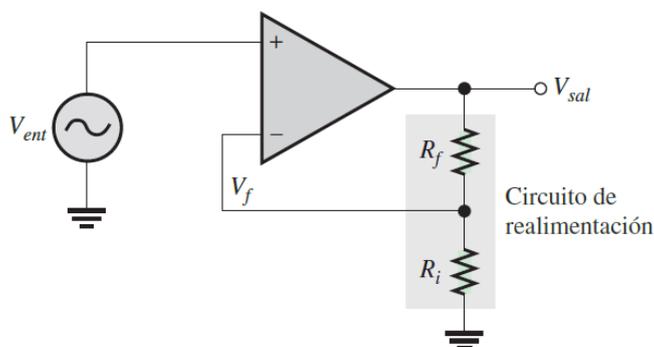
# AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON REALIMENTACIÓN NEGATIVA

## Ganancia de voltaje en lazo cerrado, $A_{cl}$

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 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 de la manera descrita a continuación. Los resistores  $R_i$  y  $R_f$  forman un circuito divisor de voltaje que reduce  $V_{sal}$  y conecta el voltaje reducido  $V_f$  a la entrada inversora. El voltaje de realimentación se expresa como



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

La diferencia del voltaje de entrada  $V_{ent}$  y el voltaje de realimentación  $V_f$ , es la entrada diferencial al amplificador operacional. 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:

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

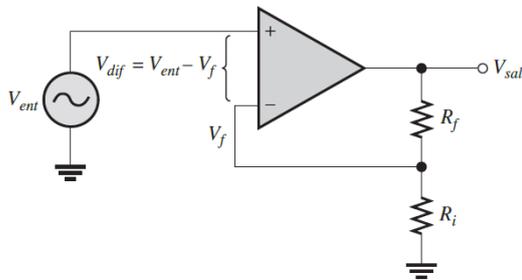
La atenuación B, del circuito de realimentación es:

$$B = \left( \frac{R_i}{R_i + R_f} \right)$$

Si  $V_f$  se sustituye por  $B \cdot V_{sal}$  en la ecuación para  $V_{sal}$ :

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

Operando:



$$\begin{aligned} V_{sal} &= A_{ol}V_{ent} - A_{ol}B \cdot V_{sal} \\ V_{sal} + A_{ol}B \cdot V_{sal} &= A_{ol}V_{ent} \\ V_{sal}(1 + A_{ol}B) &= A_{ol}V_{ent} \end{aligned}$$

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

En general, el producto  $A_{ol}B$  es típicamente mucho más grande que 1:

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

La ganancia en lazo cerrado del amplificador no inversor ( $NI$ ) es el recíproco de la atenuación ( $B$ ) de circuito de realimentación (divisor de voltaje).

$$A_{cl(NI)} = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} \cong \frac{1}{B} = \left( \frac{R_i + R_f}{R_i} \right)$$

Simplificando:

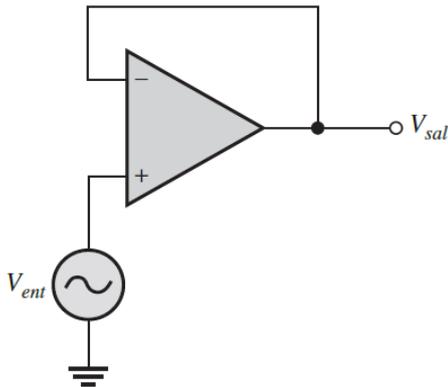
$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

**Observe que la ganancia de voltaje en lazo cerrado no depende del todo de la ganancia de voltaje en lazo abierto del amplificador operacional en la condición  $A_{ol}B \gg 1$ . La ganancia en lazo cerrado se ajusta seleccionando los valores de  $R_i$  y  $R_f$ .**

### Seguidor de tensión

La configuración de **seguidor de tensión** 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 muestra la figura. Como se puede ver, la conexión de realimentación directa tiene una ganancia de voltaje de 1 (lo que significa que no hay ganancia). La ganancia de voltaje en lazo cerrado de un amplificador no inversor es  $1/B$ , como previamente se derivó. En vista de que  $B = 1$  para un seguidor de voltaje, la ganancia de voltaje en lazo cerrado del seguidor de voltaje es

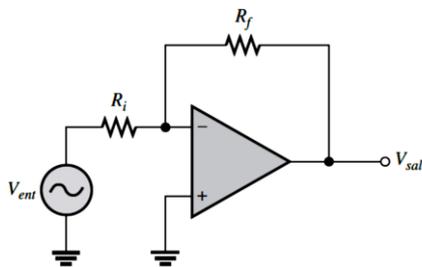
$$A_{cl(VF)} = 1$$



Las características más importantes de la configuración de **seguidor de tensión** son **muy alta impedancia de entrada y 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. La señal de entrada se aplica a través de un resistor de entrada  $R_i$  conectado en serie con la entrada inversora (-). Asimismo, la salida es realimentada a través de  $R_f$  a la misma entrada. La entrada no inversora (+) se conecta a tierra.

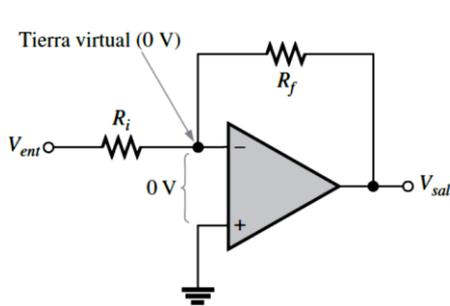


En este punto, los parámetros del amplificador operacional ideal mencionados con anterioridad son útiles porque simplifican el análisis de este circuito. En particular, el concepto de impedancia de entrada infinita es de gran valor. Una impedancia de entrada infinita implica corriente cero en la entrada inversora. Si existe corriente cero a través de la impedancia de entrada, entonces no debe haber caída de 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**. Esta condición se ilustra en la figura. 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 muestra la figura (b).

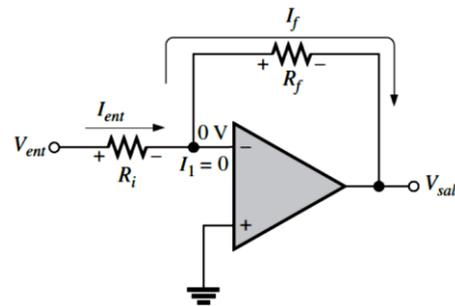
$$I_{ent} = I_f$$

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

Por otro lado:

$$I_f = \frac{-V_{sal}}{R_f}$$

Dado que  $I_f = I_{ent}$

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

Reordenando:

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

$V_{sal}/V_{ent}$  es la **ganancia total del amplificador inversor(I)**

$$A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

**Que es la ganancia de voltaje en lazo cerrado del amplificador inversor (I)**

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 indica inversión.**

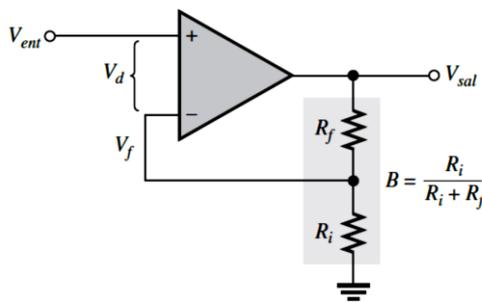
# Impedancias de un amplificador operacional

## Impedancias de un amplificador no inversor

### Impedancia de entrada

La impedancia de entrada de un amplificador no inversor se puede desarrollar con la ayuda de la figura. Para este análisis, considérese que existe un pequeño voltaje diferencial  $V_d$ , entre las dos entradas, como se indica. **Esto significa que no se puede suponer que la impedancia de entrada del amplificador es infinita o que la corriente de entrada es cero.** El voltaje de entrada puede expresarse como:

$$V_{ent} = V_d + V_f ; Z_{ent(NI)} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}}$$



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

Esta ecuación muestra que la impedancia de entrada de la configuración de amplificador no inversor  $Z_{ent(NI)}$  con realimentación negativa es mucho más grande que la impedancia de entrada interna del amplificador operacional  $Z_{ent}$

(sin realimentación).

$$V_{ent} = V_d + B \cdot V_{sal} ; Z_{ent(NI)} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}}$$

Recordando  $B$  es la atenuación del circuito de realimentación negativa y es igual a  $\frac{R_i}{(R_i + R_f)}$ .

Puesto que  $V_{sal} \cong A_{ol}V_d$  ( $A_{ol}$  es la ganancia en lazo abierto del amplificador operacional),

$$V_{ent} = V_d + B \cdot A_{ol}V_d = V_d(1 + B \cdot A_{ol})$$

Sustituyendo  $I_{ent}Z_{ent}$  por  $V_d$ :

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

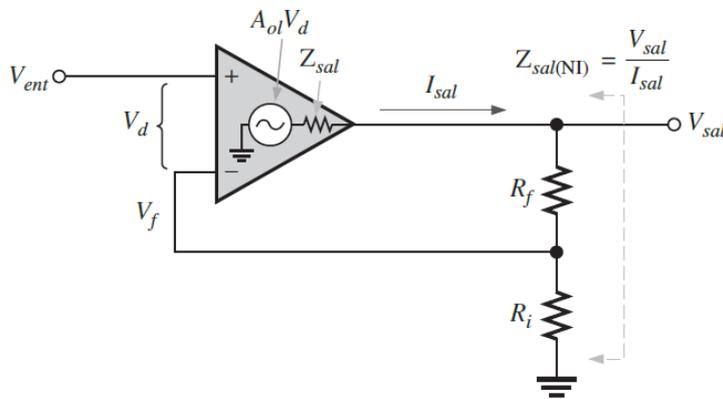
$Z_{ent}$  es la impedancia de entrada de lazo abierto ( $ol$ )

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

Teniendo en cuenta  $Z_{ent(NI)} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}}$

$$Z_{ent(NI)} = (1 + B \cdot A_{ol})Z_{ent}$$

### Impedancia de salida



En la malla de salida se cumple:

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

Sabemos que:

$$V_d = V_{ent} - V_f$$

Suponiendo  $A_{ol}V_d \gg Z_{sal}I_{sal}$

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

Sustituyendo  $B \cdot V_{sal}$  en lugar de  $V_f$

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

Operando:

$$\begin{aligned} V_{sal} &\cong A_{ol}V_{ent} - A_{ol}B \cdot V_{sal} \\ A_{ol}V_{ent} &\cong V_{sal} + A_{ol}B \cdot V_{sal} \cong (1 + A_{ol}B)V_{sal} \end{aligned}$$

La impedancia de salida del amplificador no inversor es  $Z_{sal(NI)} = \frac{V_{sal}}{I_{sal}}$  y reemplazando

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

Dividiendo ambos miembros por  $I_{sal}$ :

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

El término del primer es la impedancia de salida interna del amplificador operacional ( $Z_{sal}$ ) dado que sin realimentación  $A_{ol}V_{ent} = V_{sal}$

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

Por lo tanto:

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

Esta ecuación muestra que la impedancia de salida de la configuración de amplificador no inversor con realimentación negativa es mucho menor que la impedancia de salida interna.

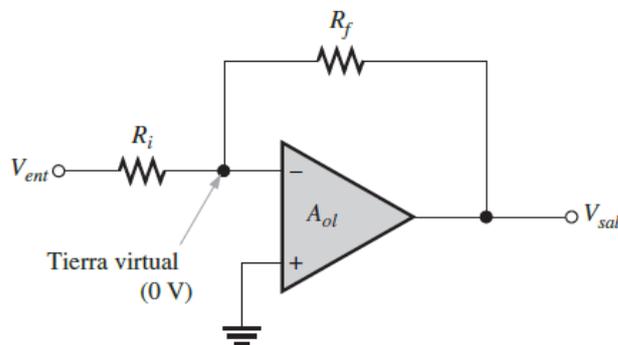
### Impedancias del seguidor de voltaje

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

$$Z_{ent(VF)} = (1 + A_{ol})Z_{ent}$$

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

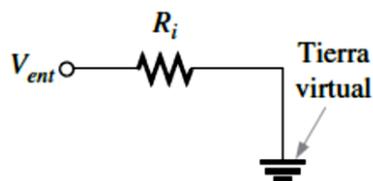
### Impedancias de un amplificador inversor



#### Impedancia de entrada

La impedancia de entrada de un amplificador inversor es:

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



Esto es porque la entrada inversora del amplificador operacional se encuentra conectada a una tierra virtual (0V) y la fuente de entrada simplemente ve a  $R_i$  conectada a tierra, como muestra la figura de la derecha.

#### Impedancia de salida

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

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

La impedancia de salida tanto del **amplificador no inversor como inversor** es muy baja; de hecho, es 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 del amplificador operacional sin que cambie el voltaje de salida. Los límites para la

impedancia de carga son determinados por la **excursión máxima pico a pico de la salida ( $V_{O(p-p)}$ ) y el límite para la corriente del amps-op.**

# RESPUESTA EN FRECUENCIA EN LAZO CERRADO

Los amps-op normalmente se utilizan en una configuración en lazo cerrado con **realimentación negativa para controlar con precisión la ganancia y el ancho de banda**. En esta sección se verá cómo afecta la realimentación la ganancia y la respuesta en frecuencia de un amplificador operacional.

La realimentación negativa reduce la ganancia en frecuencias medias de un amplificador operacional, como lo indican las siguientes expresiones de ganancia en lazo cerrado:

para las tres configuraciones de amplificadores previamente abordadas, donde  $B$  es la atenuación de realimentación.,

- para un amplificador no inversor

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

- para un amplificador inversor

$$A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i}$$

- para un amplificador seguidor de tensión

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

## Efecto de la realimentación negativa en el ancho de banda

Se sabe cómo afecta la realimentación negativa a la ganancia; ahora se verá cómo afecta el ancho de banda del amplificador. La frecuencia crítica en lazo cerrado de un amplificador operacional es:

$$f_{c(cl)} = f_{c(ol)}(1 + BA_{ol(\text{medio})})$$

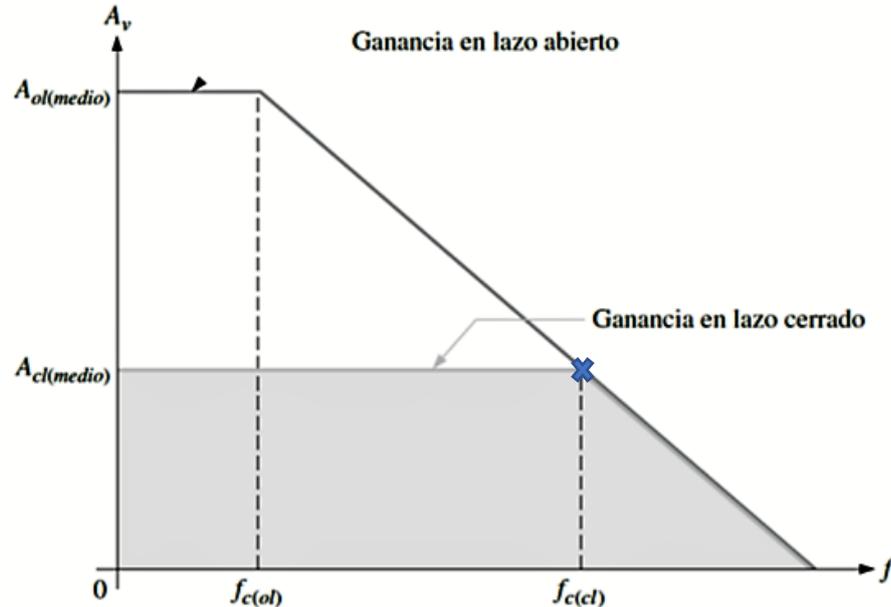
### EJEMPLO:

Cierto amplificador tiene una ganancia en frecuencias medias en lazo abierto de 150.000 y un ancho de banda de 3 dB en lazo abierto de 200 Hz. La atenuación ( $B$ ) del lazo de realimentación es de 0.002. ¿Cuál es el ancho de banda en lazo cerrado?

SOLUCIÓN:

$$BW_{cl} = BW_{ol}(1 + BA_{ol(\text{medio})}) = 200\text{Hz}[1 + (0,002 * 150.000)] = 60,2\text{Khz}$$

**La figura ilustra el concepto de respuesta en lazo cerrado. Cuando la ganancia en lazo cerrado de un amplificador operacional se reduce por la realimentación negativa, el ancho de banda se incrementa. La ganancia en lazo cerrado es independiente de**



**la ganancia en lazo abierto hasta el punto de intersección  $\times$  de las dos curvas de ganancia. Este punto de intersección es la frecuencia crítica,  $f_{c(cl)}$ , para la respuesta en lazo cerrado.**

**La ganancia en lazo cerrado tiene la misma pendiente de caída que la ganancia en lazo abierto, más allá de la frecuencia crítica en lazo cerrado.**

### Producto de ganancia-ancho de banda

**Un incremento de la ganancia en lazo cerrado reduce el ancho de banda y viceversa, de tal forma que el producto de la ganancia y el ancho de banda es una constante. Esto es cierto en tanto la pendiente de caída sea fija, como en el caso de un amplificador operacional compensado. Sea  $A_{cl}$  la ganancia de cualquiera de las configuraciones en lazo cerrado y mientras que  $f_{c(cl)}$  representa la frecuencia crítica en lazo cerrado (la misma del ancho de banda), entonces:**

$$A_{cl}f_{c(cl)} = A_{ol}f_{c(ol)}$$

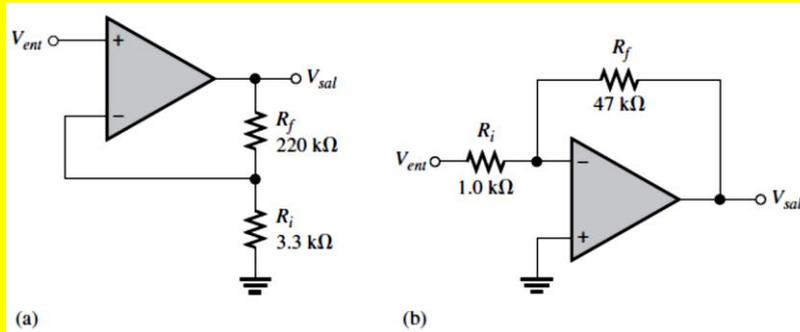
El producto de ganancia-ancho de banda siempre es igual a la frecuencia a la cual la ganancia en lazo abierto del amplificador operacional es unitaria o de  $0dB$  (ancho de banda de ganancia unitaria,  $f_T$ ).

$$f_T = A_{cl}f_{c(cl)}$$



**EJEMPLO:**

Determine el ancho de banda de cada uno de los amplificadores de la figura. Ambos amplificadores operacionales tienen una ganancia en lazo abierto de 100 dB y un ancho de banda a ganancia unitaria  $f_T = 3 \text{ MHz}$ .



**SOLUCIÓN:**

(a) Para el amplificador no inversor de la figura (a), la ganancia en lazo cerrado es:

$$A_{cl(NI)} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{220 \text{ K}\Omega}{3,3 \text{ K}\Omega} = 67,7$$

Usar la ecuación  $f_T = A_{cl} f_{c(cl)}$  y resolver para  $f_{c(cl)}$  donde ( $f_{c(cl)} = AB_{(cl)}$ )

$$f_{c(cl)} = AB_{(cl)} = \frac{f_T}{A_{cl}}$$

$$AB_{cl(NI)} = \frac{f_T}{A_{cl(NI)}} = \frac{3 \text{ Mhz}}{67,7} = 44,3 \text{ Khz}$$

(b) Para el amplificador inversor de la figura (b), la ganancia en lazo cerrado es:

$$A_{cl(I)} = -\frac{R_f}{R_i} = -\frac{47 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega} = -47$$

Utilizando el valor absoluto de  $A_{cl(I)}$ , el ancho de banda en lazo cerrado es:

$$AB_{cl(I)} = \frac{f_T}{A_{cl(I)}} = \frac{3 \text{ Mhz}}{47} = 63,8 \text{ Khz}$$