

# Capitulo 1

**Amplificadores operacionales: comportamiento ideal y real**

**MSc. Jesús David Quintero Polanco**

**[jdavid@usco.edu.co](mailto:jdavid@usco.edu.co)**

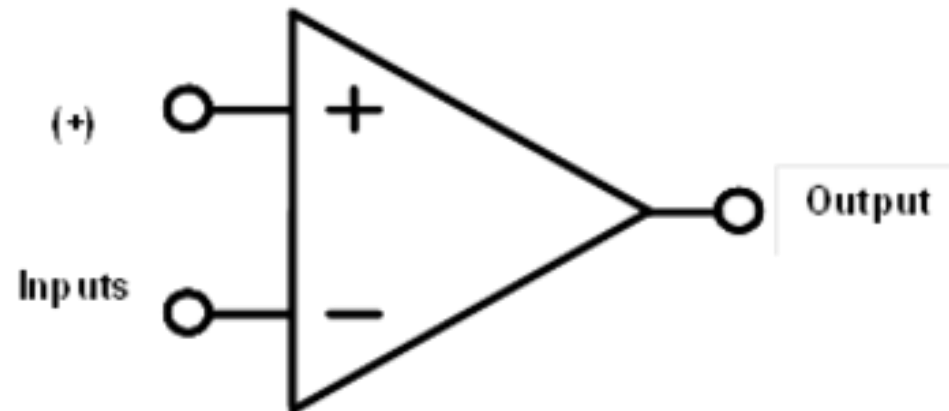
**[Grupo en Facebook INGENIERIA ELECTRONICA USCO](#)**

# Operational Amplifier basics

## El amplificador operacional de retroalimentación de voltaje ideal

El amplificador operacional (op amp) es uno de los componentes básicos del diseño lineal. En su forma básica consta de dos terminales de entrada, uno de los cuales invierte la fase de la señal, el otro conserva la fase y un terminal de salida.

Los amplificadores operacionales a menudo se dividen en dos tipos, los que usan una fuente de alimentación positiva y negativa y los que usan solo una fuente de alimentación, generalmente positiva.



## Modelo de retroalimentación de voltaje ideal (VFB)

El modelo más básico del amplificador operacional de retroalimentación de voltaje ideal tiene las siguientes características:

1. Impedancia de entrada infinita  $i_n = i_p = 0$
2. Ancho de banda infinito
3. Ganancia de voltaje infinita
4. Impedancia de salida cero
5. Consumo de energía cero

Ninguno de estos puede ser realmente realizado. Lo cercano a una implementación real a estos ideales determina la calidad del amplificador operacional. Dado que no todas estas características ideales se pueden maximizar al mismo tiempo, muchos diseños de amplificadores operacionales reales intercambian una o más características por las demás. Esto se conoce como el modelo de retroalimentación de voltaje.

## AMPLIFICADOR OPERACIONAL EN MODO INVERSOR

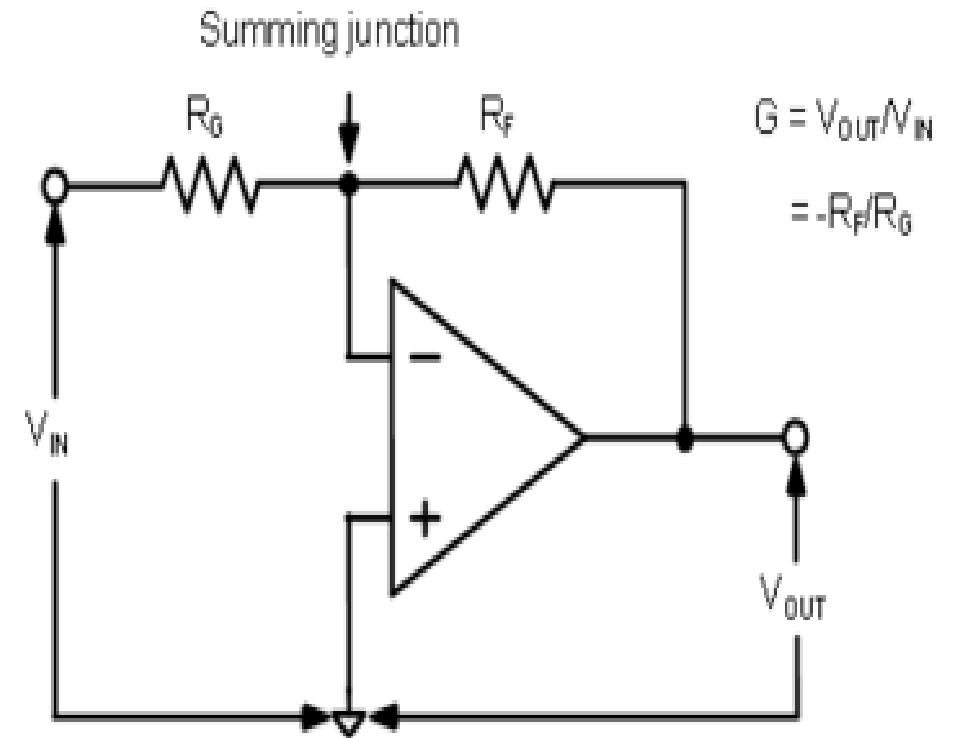
La salida está desfasada  $180^\circ$  con la entrada.  
La ganancia de señal de este circuito está determinada por la relación de las resistencias utilizadas y está dada por:

$$G = -\frac{R_F}{R_G}$$

La impedancia de entrada, como siempre, es la impedancia a tierra para una señal de entrada.

La entrada - tiene el mismo voltaje que la entrada + que está conectada a tierra. Por lo tanto, podemos considerar que la entrada está en lo que se denomina tierra virtual. La impedancia de entrada para el amplificador general será

$$Z_{in} = R_G$$

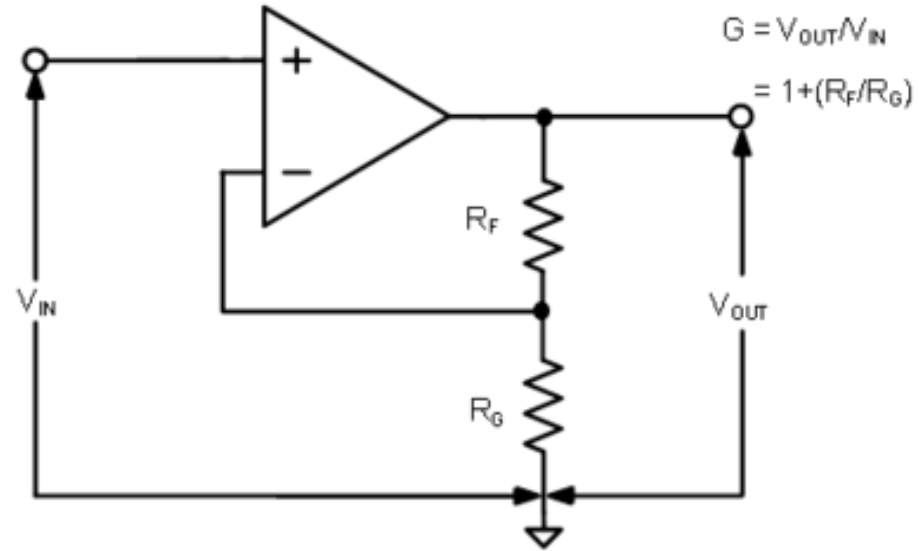


## AMPLIFICADOR OPERACIONAL EN MODO NO INVERSOR

$$G = 1 + \frac{R_F}{R_G}$$

La impedancia de entrada, como siempre, es la impedancia a tierra para una señal de entrada. Dado que ninguna corriente puede entrar o salir de la entrada +, la impedancia de entrada es infinita:

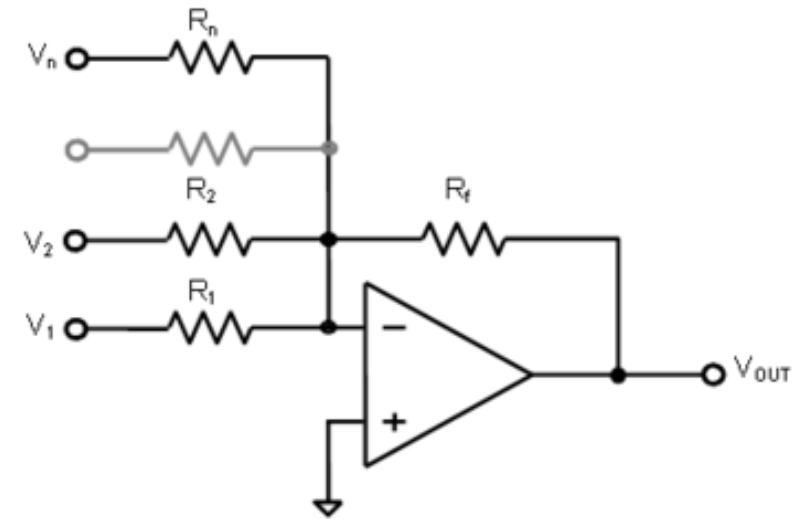
$$Z_{in} = \infty$$



## AMPLIFICADOR OPERACIONAL SUMADOR INVERSOR

Si todas las resistencias de entrada  $R_1, R_2, \dots, R_n$  son iguales pero no iguales a  $R_f$ , entonces de la ecuación podemos ver que se puede simplificar de modo que la salida sea igual a la suma algebraica de las entradas por a factor de ganancia común será  $G = -R_f / R_1$ .

Si todas las resistencias se igualan, incluida  $R_f$ , la salida será simplemente la suma negativa de las entradas.



$$V_{OUT} = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

Laboratorio 1. [Amplificadores operacionales simples](#)

Laboratorio 1. [Amplificadores operacionales simples](#)

Laboratorio 3 [Amplificador sumador](#)

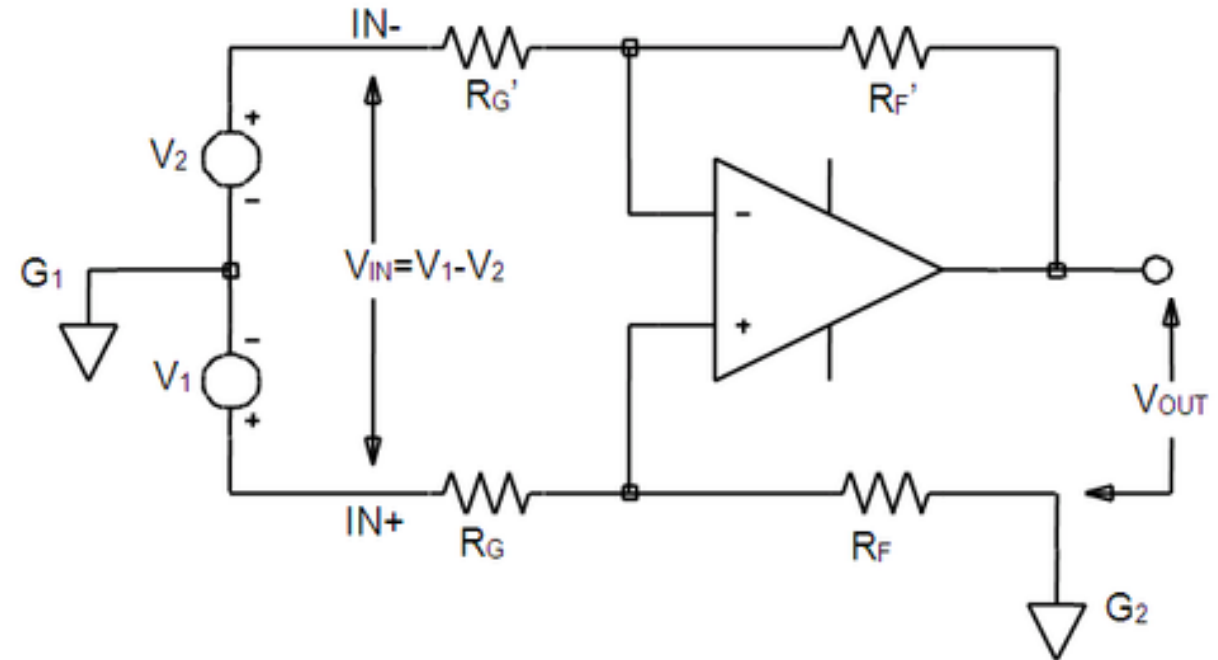
## AMPLIFICADOR OPERACIONAL DIFERENCIAL

Las resistencias emparejadas de la red de entrada y retroalimentación establecen la ganancia de esta etapa.

Estas resistencias,  $R_F - R_G$  y  $R_F' - R_G'$ , deben coincidir como se indica, para un funcionamiento adecuado.

Tenga en cuenta que la etapa está diseñada para amplificar la diferencia de voltajes  $V_1$  y  $V_2$ , por lo que la entrada neta es  $V_{IN} = V_1 - V_2$ . La expresión general de ganancia es entonces

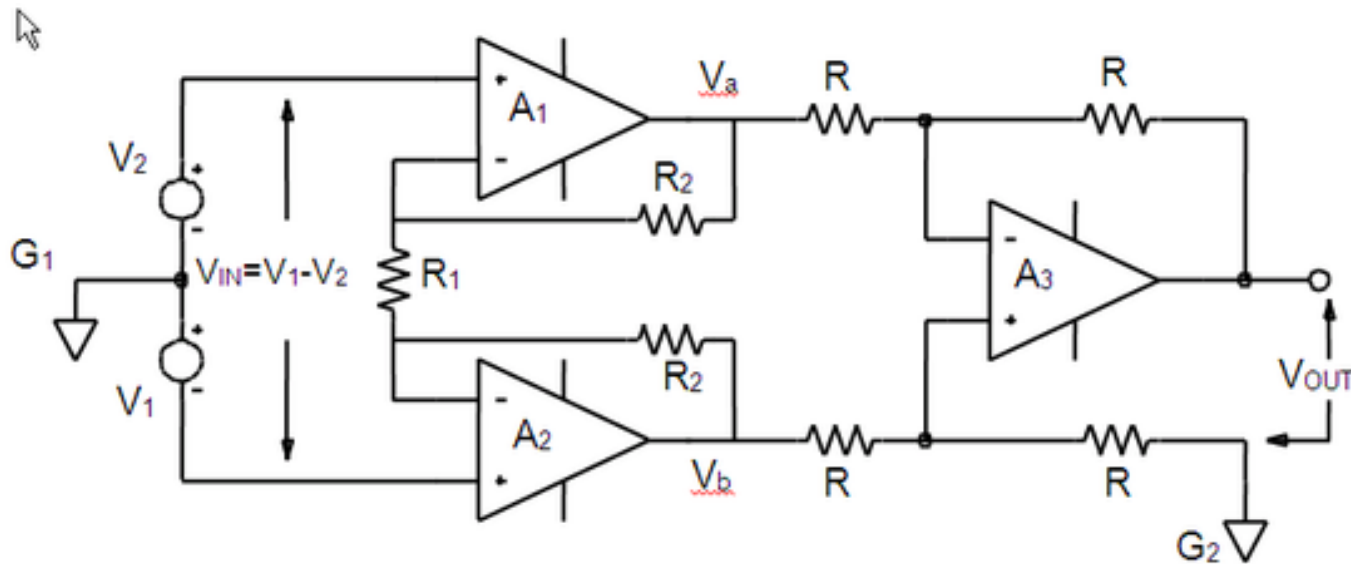
$$G = \frac{V_{OUT}}{V_1 - V_2}$$



Laboratorio 4, Amplificador de diferencia [Amplificador de diferencia de detección de corriente](#)

## AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

Los amplificadores de instrumentación son amplificadores diferenciales de alta ganancia con alta impedancia de entrada y una salida de un solo extremo. Se utilizan principalmente para amplificar señales diferenciales muy pequeñas de ciertos tipos de transductores o sensores, como galgas extensométricas, termopares o resistencias de detección de corriente en sistemas de control de motores.



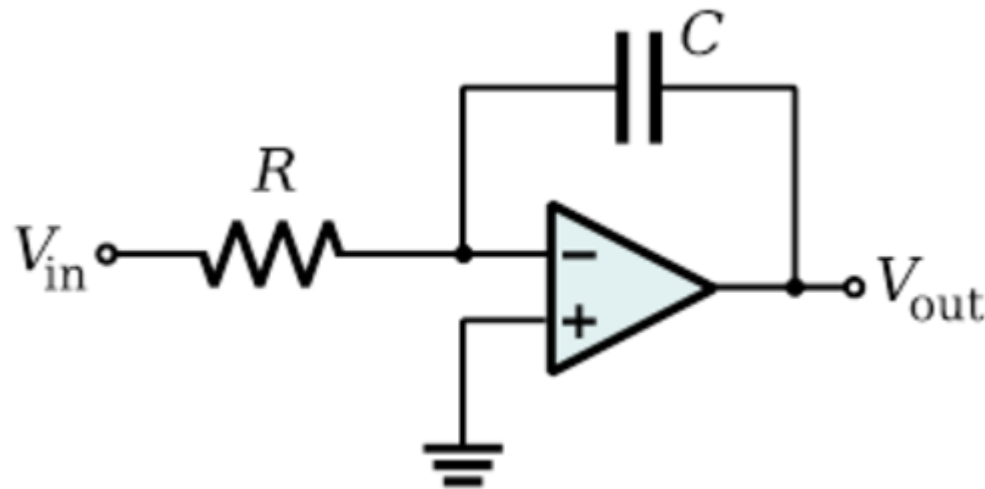
$$V_{OUT} = (V_1 - V_2) \left[ 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right]$$



## EL INTEGRADOR INVERSOR IDEAL

Un integrador es un circuito que tiene un voltaje de salida que es proporcional a la integral de tiempo de su voltaje de entrada.

En el dominio del tiempo se tiene

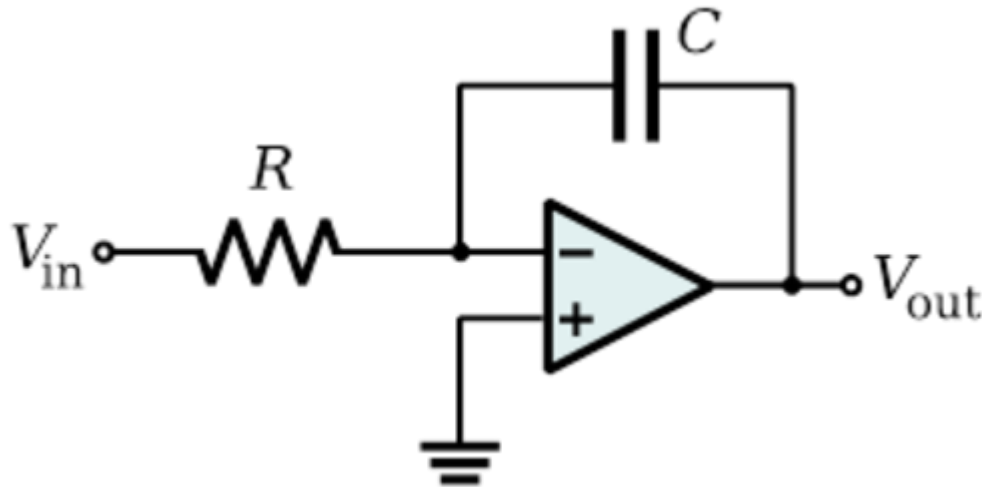


$$\begin{aligned}(V_n - V_i)/R + C \cdot dV_c/dt + i_n &= 0 \quad \text{Como } V_c = V_n - V_{out} \\ (V_n - V_i)/R + C \cdot d(V_n - V_{out})/dt &= 0 \quad \text{Como } V_n = V_p = 0 \text{ e } i_n = 0 \\ (-V_i)/R + C \cdot d(-V_{out})/dt &= 0 \\ V_i/R &= -C \cdot dV_{out}/dt \\ -[V_i/R \cdot C] \cdot dt &= dV_{out} \quad \text{integrando en ambos lados} \\ [-1/R \cdot C] \cdot \int V_i \cdot dt &= \int dV_{out} \\ [-1/R \cdot C] \cdot \int V_i \cdot dt &= V_{out} - V_{out-inicia}\end{aligned}$$

$$V_{out} = - \int_0^t \frac{V_{in}}{RC} dt + V_{initial}$$

## EL INTEGRADOR INVERSOR IDEAL

En el dominio de la frecuencia se tiene

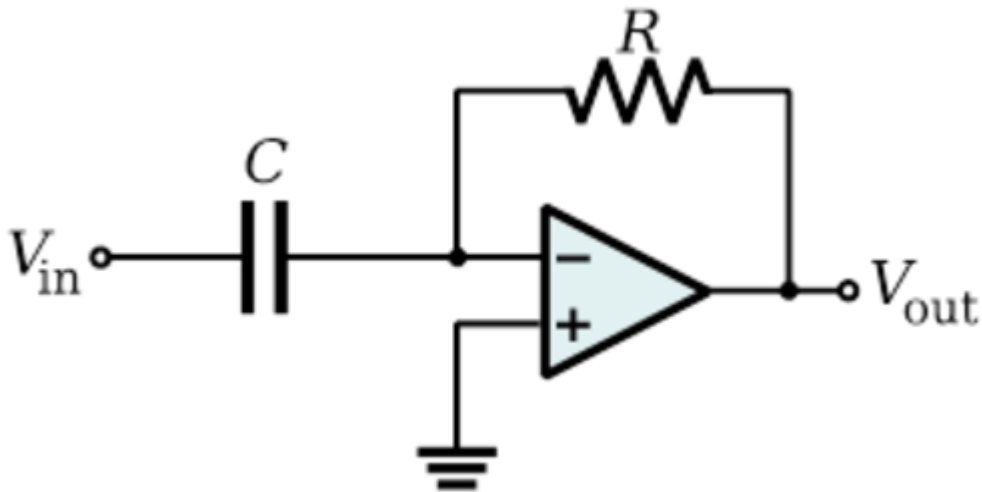


$$\begin{aligned} ((V_n - V_i)/R + C \cdot dV_c/dt + i_n) &= 0 \quad \text{Como } V_c = V_n - V_{out} \\ (V_n - V_i)/R + C \cdot d(V_n - V_{out})/dt &= 0 \quad \text{Como } V_n = V_p = 0 \text{ e } i_n = 0 \\ (-V_i)/R + C \cdot d(-V_{out})/dt &= 0 \\ V_i/R &= -C \cdot dV_{out}/dt \\ V_i/R \cdot C &= -S \cdot V_{out} \\ V_{out} &= -V_i/R \cdot C \cdot S \\ G = V_{out}/V_i &= -1/R \cdot C \cdot S \end{aligned}$$

$$Z_{in} = R$$

## EL DIFERENCIADOR IDEAL

Un diferenciador es un circuito que tiene un voltaje de salida que es proporcional a la derivada del tiempo de su voltaje de entrada.



$$Z_{in} = \frac{1}{Cs}$$

En el dominio del tiempo se tiene

$$(V_n - V_{out})/R - C \cdot dV_c/dt = 0 \quad \text{Como } V_c = V_{in}$$

$$(V_n - V_{out})/R - C \cdot d(V_{in})/dt = 0 \quad \text{Como } V_n = V_p = 0$$

$$-V_{out}/R - C \cdot dV_{in}/dt = 0$$

$$V_{out} = -R \cdot C \cdot dV_{in}/dt$$

En el dominio de la frecuencia se tiene

$$V_{out} = -R \cdot C \cdot dV_{in}/dt$$

$$V_{out} = -R \cdot C \cdot V_{in} \cdot s$$

$$G = V_{out} / V_{in} = -R \cdot C \cdot s$$

# AMPLIFICADORES OPERACIONALES: COMPORTAMIENTO NO IDEAL

Para muchas de las aplicaciones de baja frecuencia e instrumentación, los amplificadores operacionales que actualmente se fabrican tienen un comportamiento ideal. Sin embargo, cuando se les aplica a situaciones de mayor precisión o requisitos más restrictivos se necesita considerar modelos más detallados de su comportamiento.

La forma habitual de analizar un circuito que se basa en un amplificador operacional, parte de considerar inicialmente un comportamiento ideal, y luego, partiendo de este estudio se analizan las limitaciones que sobre el mismo introducen las diferentes características reales específicas del amplificador.

El resultado de este análisis es, bien la validación del amplificador operacional, o la propuesta de su sustitución por otro tipo de amplificador operacional con características más adecuadas.

## **Análisis del Amplificador Operacional Ideal y Real**

Para analizar un circuito en el que haya A.O. se usa el método aplicado en el ideal:

1. Comprobar si tiene realimentación negativa
2. Si tiene realimentación negativa se aplican las reglas del Amp Op ideal.
3. Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito.
4. Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos).
5. Aplicando las reglas del apartado 2 resolver las ecuaciones para despejar la tensión en los nodos donde no se conozca.

## Tabla de Características del Amplificador Operacional Ideal y Real

Parametro	Valor Ideal	Valor Real
$Z_i$	$\infty$	10 T $\Omega$
$Z_o$	0	100 Ohm
Bw	$\infty$	1 MHz
$A_v$	$\infty$	100.000
$A_c$	0	

**Nota:** Los valores reales dependen del modelo, estos valores son genéricos y son una referencia.

Si van a usarse amplificadores operacionales, es mejor consultar el datasheet o características del fabricante.

	<b>Ideal</b>	<b>741 de propósito general</b>	<b>715 de alta velocidad</b>	<b>5534 de bajo ruido</b>
Ganancia de voltaje, $G_0$	$\infty$	$1 \times 10^5$	$3 \times 10^4$	$10^5$
Impedancia de salida, $Z_0$	0	$75 \Omega$	$75 \Omega$	$0.3 \Omega$
Impedancia de entrada, $Z_{in}$ (malla abierta)	$\infty$	$2 \text{ M}\Omega$	$1 \text{ M}\Omega$	$100 \text{ K}\Omega$
Corriente de desbalance, $I_{io}$	0	$20 \text{ }\mu\text{A}$	$250 \text{ }\mu\text{A}$	$300 \text{ }\mu\text{A}$
Voltaje de desbalance, $V_{i0}$	0	2 mV	10 mV	5 mV
Ancho de banda, BW	$\infty$	1 MHz	65 MHz	10 MHz
Velocidad de respuesta, SR	$\infty$	$0.7 \text{ V}/\mu\text{s}$	$100 \text{ V}/\mu\text{s}$	$13 \text{ V}/\mu\text{s}$

Un Amp Op real difiere del comportamiento ideal en dos aspectos:

- Consume intensidades en sus entradas.
- Introduce errores en la comparación de las señales de entrada.

Otra diferencia significativa entre los Amp Op ideales y los reales está en la ganancia de voltaje.

El Amp Op ideal tiene una ganancia de voltaje que tiende a infinito, a diferencia del real tiene una ganancia de voltaje finita que disminuye cuando aumenta la frecuencia.

En relación al voltaje offset de entrada  $V_{os}$  o llamado voltaje de desbalance, es el voltaje que debe aplicarse a una u otra de las terminales de entrada, para que el voltaje de salida sea cero, el error en el voltaje de salida se produce por la diferencia de voltajes de entrada del amplificador operacional.

Por otro lado las corrientes de offset idealmente son iguales y así su diferencia es cero. En un amplificador real estas dos corrientes no son exactamente iguales.

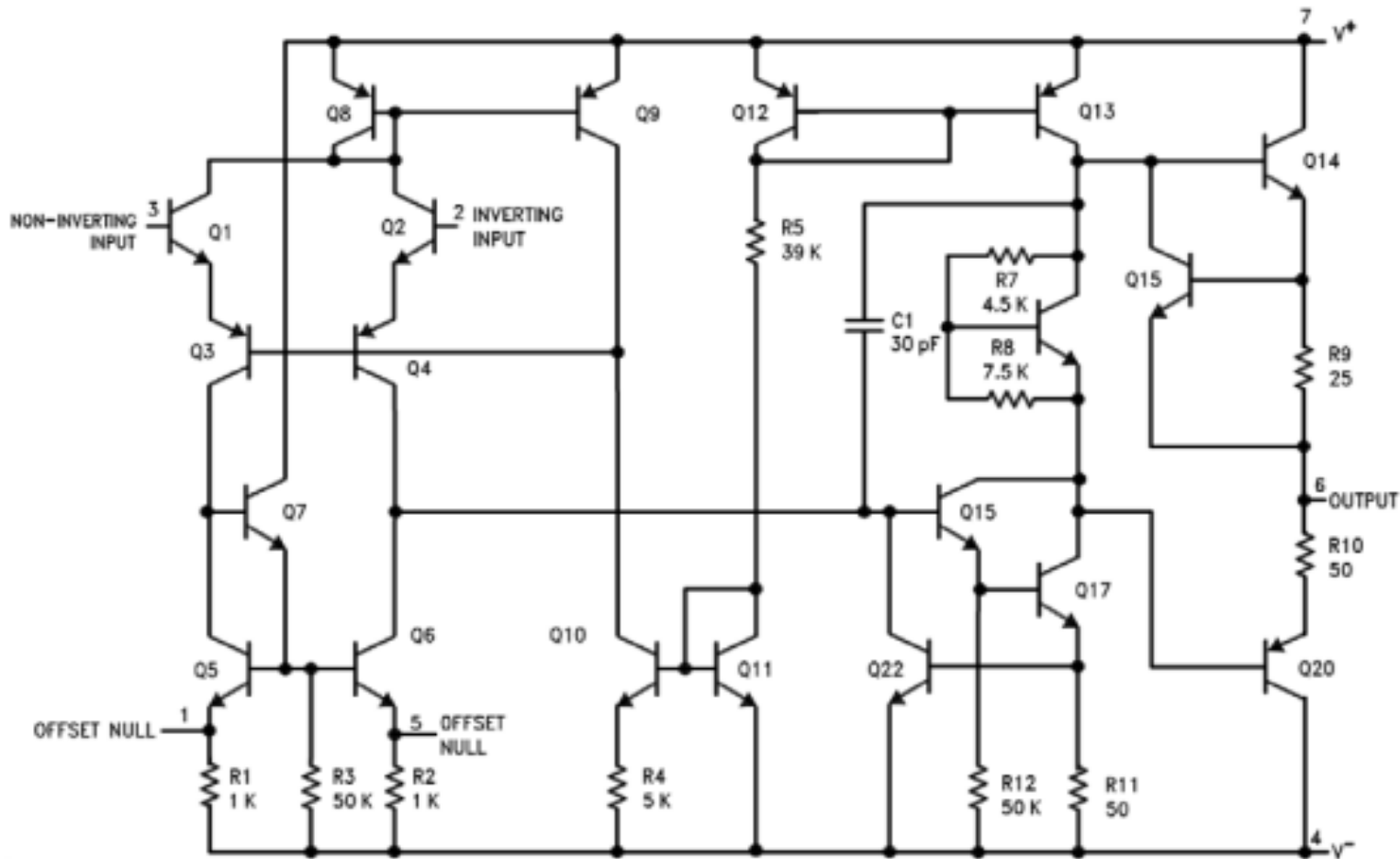


La forma habitual de analizar un circuito que se basa en un amplificador operacional, parte de considerar inicialmente un comportamiento ideal, y luego, partiendo de este estudio se analizan las limitaciones que sobre el mismo introducen las diferentes características reales específicas del amplificador.

Dos amplificadores operacionales de propósito general y de uso muy frecuente son:

- AD741: Amplificador operacional realizado con tecnología bipolar.
- TL081: Amplificador operacional realizado con tecnología JFET.

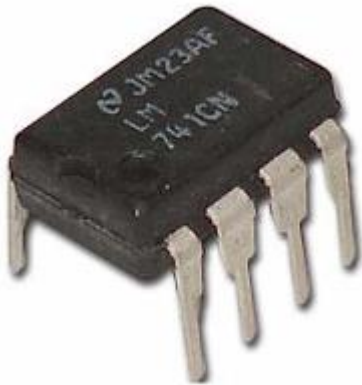
El circuito equivalente del amplificador operacional 741 se muestra en la figura. Es un diseño complejo de tercera generación, compuesto de un capacitor, 11 resistencias y 27 transistores.



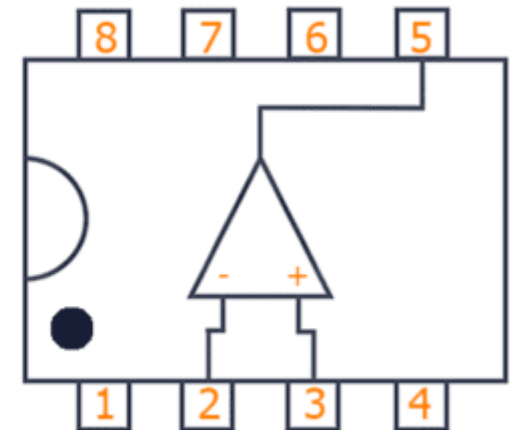
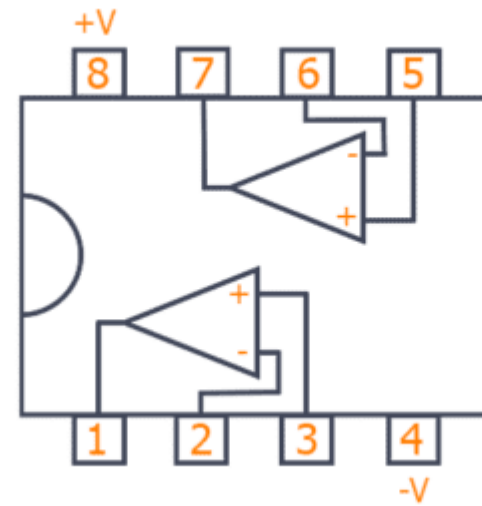
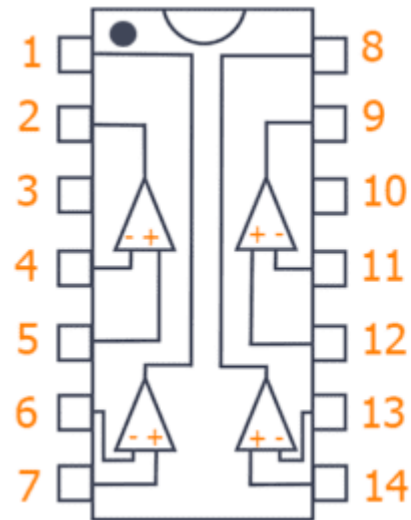
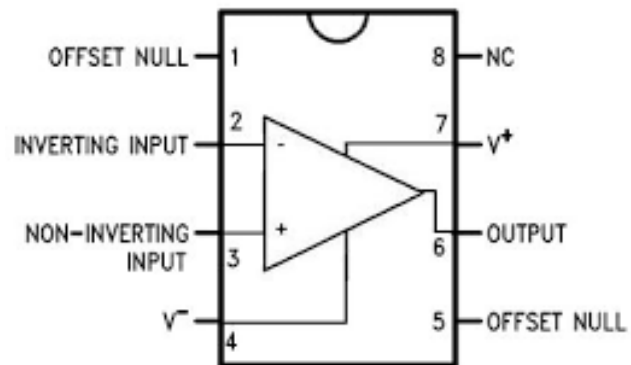
La etapa de entrada consiste en una configuración diferencial constituida por los transistores Q1, Q2, Q3 y Q4, un circuito de polarización constituida por los transistores Q5, Q6 y Q7, y una carga compuesta por el transistor Q8.

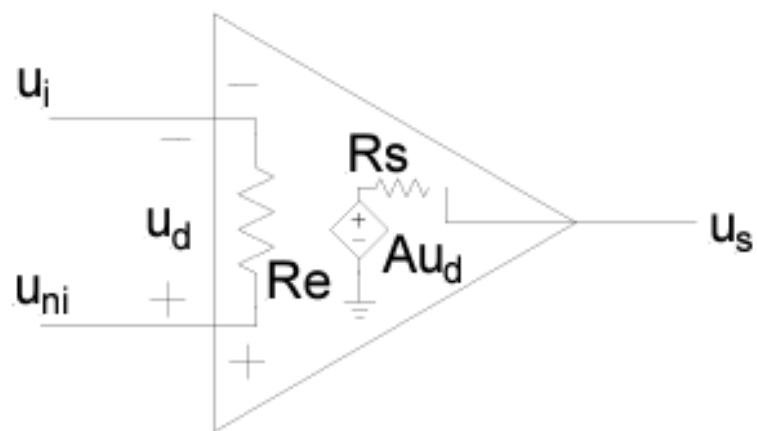
Los Amp Op reales se consiguen comercialmente en circuitos integrados de varias formas.

La figura presenta un encapsulado típico de Amp Op en línea doble de 8 y 14 terminales (o DIP, por sus siglas en inglés de dual in-line package).

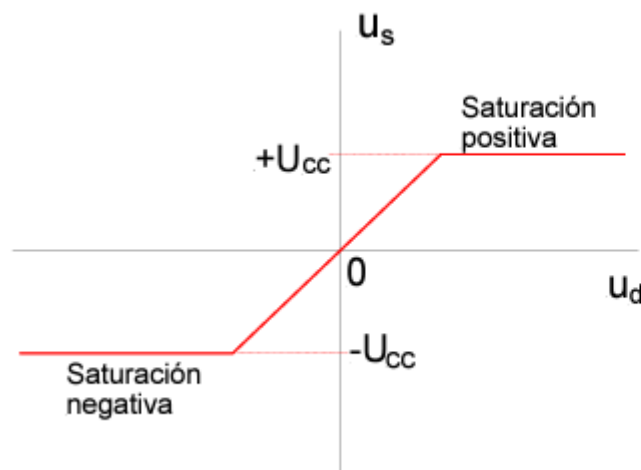


LM741 Pinout Diagram





Modelo real de un AmpOp



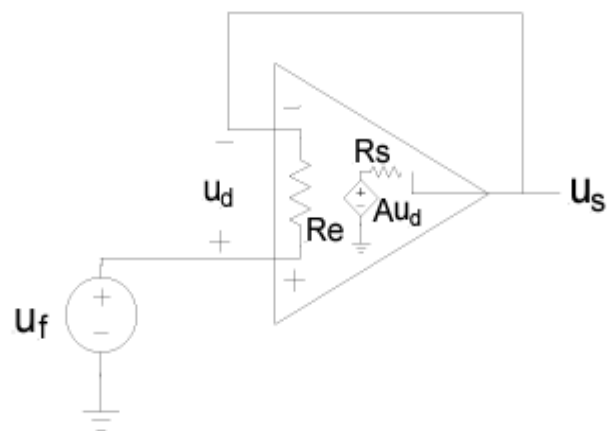
Saturación positiva:  $u_s = +U_{cc}$

Saturación negativa:  $u_s = -U_{cc}$

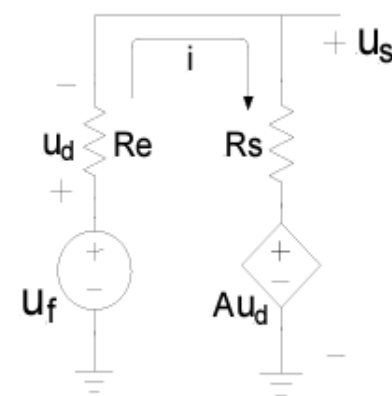
Región lineal:  $-U_{cc} \leq u_s \leq +U_{cc}$

$$u_s = Au_d$$

Para simplificar el análisis, se puede redibujar el circuito



Circuito seguidor de tensión asociado al modelo real del AmpOp



Circuito simplificado del seguidor de tensión asociado al modelo real del AmpOp

En la siguiente tabla se muestra las características del amplificador operacional AD741 relativas al rango de entradas permitida.

Para una alimentación nominal de  $\pm 13\text{ V}$ , el rango admitido es de  $\pm 12\text{ V}$ . los rangos de ganancia van desde los 70 hasta 90 como máximo.

**AD741 Series—SPECIFICATIONS** (typical @ +25°C and  $\pm 15\text{ V}$  dc, unless otherwise noted)

Model	Min	AD741C Typ	Max	Min	AD741 Typ	Max	Min	AD741J Typ	Max	Units
INPUT VOLTAGE RANGE <sup>1</sup>										
Differential, max Safe									$\pm 30$	V
Common-Mode, max Safe	$\pm 12$	$\pm 13$		$\pm 12$	$\pm 13$			$\pm 15$		V
Common-Mode Rejection, $R_S = \leq 10\text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$ , $V_{IN} = \pm 12\text{ V}$	70	90		70	90		80	90		dB

En la siguiente tabla se muestra la especificación que da el fabricante del amplificador operacional AD741 relativa a las intensidades de offset de entrada.

Model	Min	AD741C Typ	Max	Min	AD741 Typ	Max	Min	AD741J Typ	Max	Units
INPUT OFFSET CURRENT										
Initial		20	200		20	200		5	50	nA
$T_A = \text{min to max}$		40	300		85	500			100	nA
Average vs. Temperature								0.1		nA/°C
INPUT BIAS CURRENT										
Initial		80	500		80	500		40	200	nA
$T_A = \text{min to max}$		120	800		300	1,500			400	nA
Average vs. Temperature								0.6		nA/°C

Puede observarse que los valores típicos son:

$$\begin{array}{lll}
 T=25^{\circ}\text{C} & I_{B \text{ typ}} < 80\text{nA} & I_{B \text{ Max}} < 500\text{nA} \\
 & I_{OS \text{ typ}} < 20 \text{ nA} & I_{OS \text{ Max}} < 200 \text{ nA}
 \end{array}$$

Sin embargo el fabricante no es capaz de garantizar estos valores y establece valores limites (máximo posiblemente poco probables) de un orden de magnitud superior.

Las intensidades de polarización y de offset son fuertemente dependientes de la temperatura

Si se prevé que la temperatura puede fluctuar ampliamente dentro del rango de temperaturas de operación ( $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ ), estos valores se incrementan.

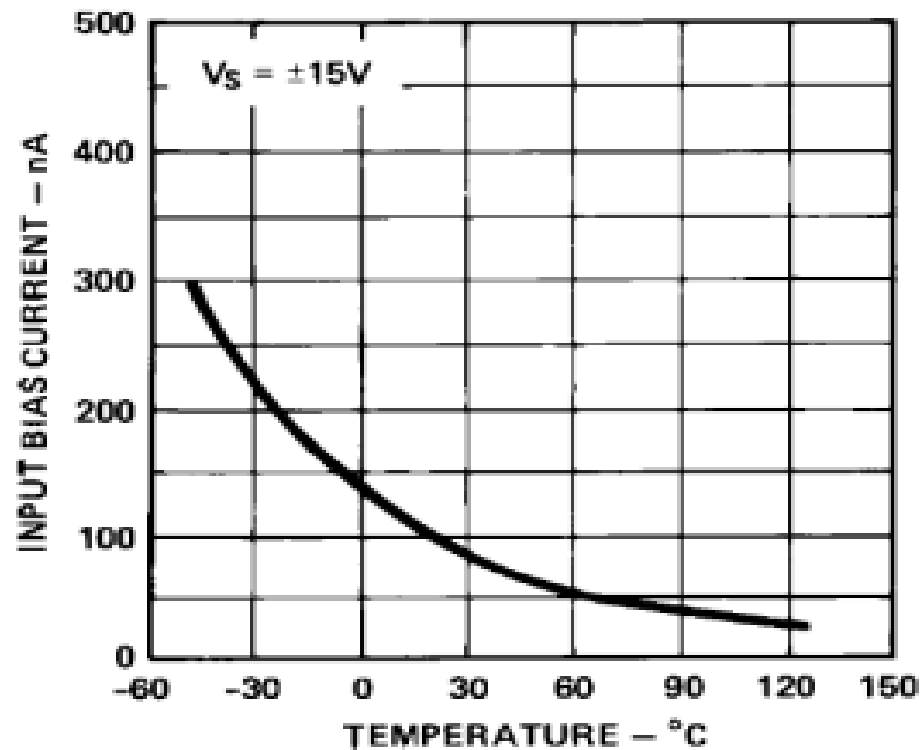


Figure 1. Input Bias Current vs. Temperature

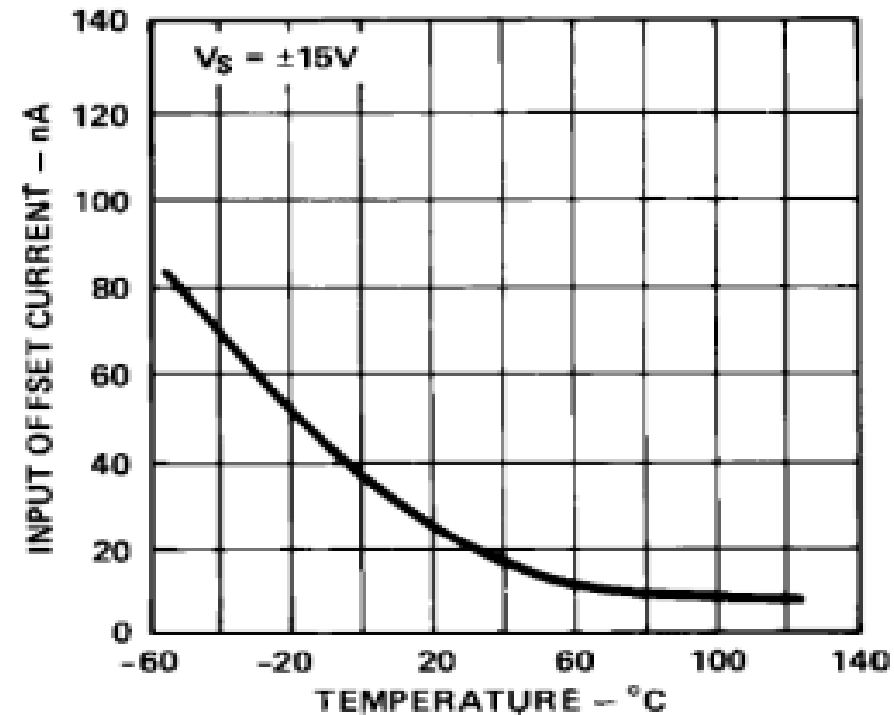


Figure 2. Input Offset Current vs. Temperature

TENSIÓN OFFSET DE ENTRADA (VOS).

El voltaje de offset de entrada (VOS) es la entrada diferencial que hay que aplicar al amplificador operacional para que el voltaje de salida sea cero.

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de la especificación del offset de entrada que el fabricante da del amplificador operacional AD741.

Model	AD741C			AD741			AD741J			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT OFFSET VOLTAGE										
Initial, $R_s \leq 10\text{ k}\Omega$ , Adjust to Zero		1.0	6.0		1.0	5.0		1.0	3.0	mV
$T_A = \text{min to max}$		1.0	7.5		1.0	6.0			4.0	mV
Average vs. Temperature (Untrimmed)									20	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs. Supply, $T_A = \text{min to max}$								30	100	$\mu\text{V}/\text{V}$

En este caso el fabricante da un valor típico

$(T = 25^\circ\text{C})$

$V_{OS\text{ typ}} = 1.0\text{ mV}$

$V_{OS\text{ max}} = 5\text{ mV}$



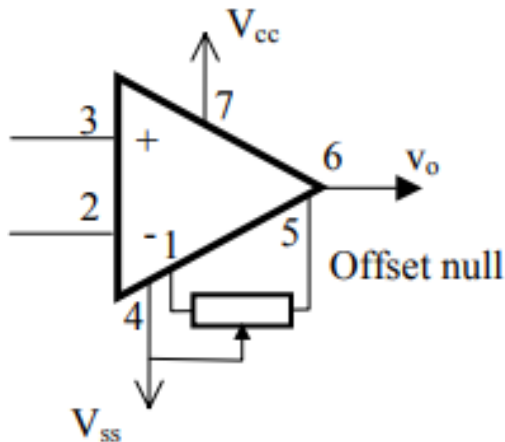
## Hay dos formas de atenuar el efecto del offset de tensión:

1. Seleccionando el amplificador operacional adecuado. Los fabricantes reducen el offset de tensión de entrada de los amplificadores operacionales utilizando técnicas especiales de diseño del amplificador. Actualmente se ofrecen amplificadores operacionales con offset muy bajos.

Ejemplo: OP-27 (Precision Monolithics)  $V_{OS} = 10 \mu V$  (typ)  $25 \mu V$  (max)  $\Delta V_{OS}/\Delta T = 0.2 \mu V/^{\circ}C$

2. En aplicaciones de precisión, se debe compensar el efecto combinado del offset de tensión de entrada, de la intensidad de polarización y de la intensidad de offset. A tal fin, la mayoría de los amplificadores operacionales ofrecen un circuito específico de compensación de los offsets.

En la figura adjunta se muestra el que es propuesto para el amplificador operacional AD741.



Los amplificadores operacionales ADI DigiTrim™ CMOS tienen voltajes de compensación inferiores a  $100 \mu V$  (p. ej., AD8603, AD8607, AD8609, AD8605, AD8606, AD8608).

## Impedancia de entrada diferencial (ZIN Diff).

La impedancia diferencial de entrada de un amplificador operacional describe la componente de la intensidad en los terminales de entrada que es función de la diferencia de tensión entre ellos.

En un amplificador operacional ideal la impedancia de entrada es infinita. En amplificador real tiene un valor grande pero finito. En la siguiente tabla se muestra la información que describe esta característica en el amplificador operacional AD741. En este caso su valor  $2\text{M}\Omega$  es alto.

Model	AD741C			AD741			AD741J			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT IMPEDANCE DIFFERENTIAL	0.3	2.0		0.3	2.0		1.0			$\text{M}\Omega$

El valor de la impedancia de entrada es fuertemente dependiente de la frecuencia. Tiene una componente capacitiva, que hace decrecer la impedancia de entrada cuando la frecuencia se incrementa.

## COMPORTAMIENTO REAL DEL CIRCUITO DE SALIDA.

El comportamiento real de un amplificador operacional en cuanto a su capacidad para controlar la tensión de salida con independencia de la carga conectada a ella es muy dependiente del tipo de amplificador operacional.

**Amplificador operacional de propósito general.** Su finalidad es acondicionar o procesar señales. Las cargas que deben soportar son de alta impedancia, y la intensidad y los rangos de tensión que debe proporcionar son bajas. Son los estudiados en este tema.

**Amplificador operacional de potencia.** Su objeto es transferir potencia a cargas de baja impedancia y deben tener capacidad de proporcionar en su salida intensidades y rangos de tensiones altos. Serán estudiados dentro de los circuitos de potencia en el capítulo V.

**Amplificador operacional para conmutación (Comparador).** Su objeto es comparar señales y generar en su salida señales que serán interpretadas como señales digitales binarias. Serán estudiados dentro de los circuitos comparadores en el capítulo VII.

**TENSIÓN MÁXIMA DE SALIDA (OUTPUT VOLTAGE SWING).**

La tensión máxima que puede establecer un amplificador operacional en su salida está limitada por las tensiones de alimentación (VCC y VEE).

Se denomina tensión de saturación de salida a la tensión máxima (Vsat+) y mínima (Vsat-) que la salida del amplificador operacional puede alcanzar. Esta suele ser de 0.5V a 2 V por debajo de la tensión de alimentación.

**AD741 Series**

Model	Min	AD741K Typ	Max	Min	AD741L Typ	Max	Min	AD741S Typ	Max	Units
OUTPUT CHARACTERISTICS										
Voltage @ $R_L = 1\text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$										V
Voltage @ $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$	$\pm 10$	$\pm 13$		$\pm 10$	$\pm 13$		$\pm 10$	$\pm 13$		V
Short Circuit Current		25			25			25		mA

**INTENSIDAD MÁXIMA DE SALIDA(OUTPUT SHORT-CIRCUIT CURRENT).**

Los amplificadores operacionales tienen un limitador de intensidad de salida, que evita que el amplificador operacional se destruya cuando su salida se cortocircuita a tierra. El limitador evita que la intensidad pueda incrementarse por encima de un cierto valor especificado que denominamos intensidad de saturación de salida (Output ShortCircuit Current).

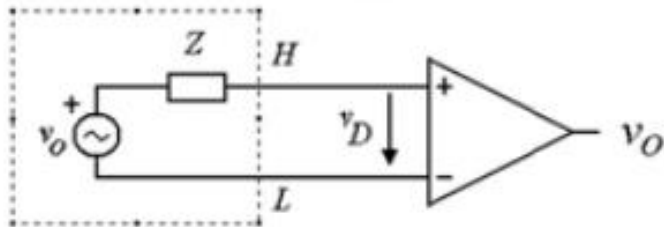
OUTPUT CHARACTERISTICS						
Voltage @ $R_L = 1\text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$						V
Voltage @ $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$	$\pm 10$	$\pm 13$	$\pm 10$	$\pm 13$	$\pm 10$	$\pm 13$
Short Circuit Current		25		25		25
						mA

En la tabla se muestra que para el amplificador AD741, esta es de 25 mA.

**RAZÓN DE RECHAZO EN MODO COMÚN (CMRR):** es la relación entre la ganancia diferencial y la ganancia en modo común del amplificador operacional. El CMRR es un parámetro que mide la cantidad de ruido que puede eliminar un amplificador.

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \Leftrightarrow CMRR|_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (dB)$$

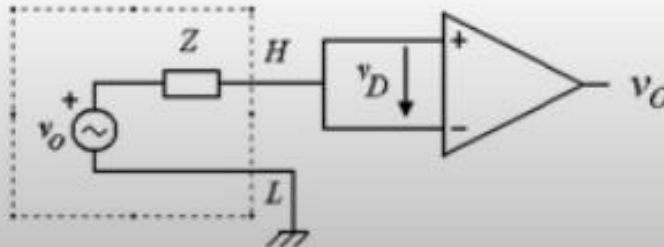
Amplificación de una señal diferencial:



$$v_o = a \cdot v_D = a \cdot (v_+ - v_-)$$

El A.O. amplifica la señal diferencial

Amplificación de una señal en modo común:



$$v_o = a \cdot v_D = a \cdot (v_x - v_x) = a \cdot 0 = 0$$

El A.O. elimina la señal en modo común

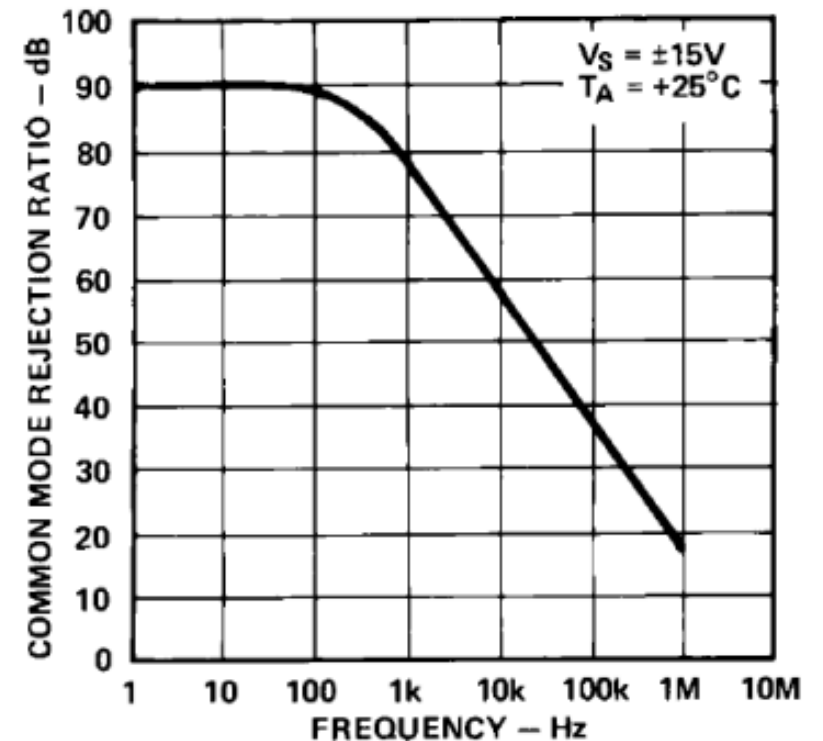
En la siguiente figura se muestran las características relativas al CMRR del amplificador AD741. Su valor típico es de 90 dB y en cualquier caso es superior a 70 dB

Model	AD741C			AD741			AD741J			Units
Common-Mode Rejection, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$ , $T_A = \text{min to max}$ , $V_{IN} = \pm 12 \text{ V}$	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
	70	90		70	90		80	90		dB

El CMRR es una función de la frecuencia y de los niveles de señal. El valor que se proporciona en la tabla previa es un valor para baja señal y baja frecuencia.

Obsérvese que el CMRR se degrada a frecuencias muy bajas en el rango de 10 a 100 Hz.

El efecto de un CMRR finito en un amplificador operacional es la presencia de una señal indebida en la salida del amplificador que es función de la componente de señal en modo común que hay en su entrada.



La unidad logarítmica relativa “decibelio (dB)” son ideales para describir la ganancia de un sistema electrónico, o sea, la relación entre la señal de salida y de entrada.

En electrónica los decibelios son utilizados para describir la ganancia de los amplificadores o atenuación de una señal en los cables.

$$P_{\text{(dBW)}} = 10 \cdot \log_{10} (P_{\text{(W)}} / 1\text{W})$$

Por ejemplo: ¿cuál es la potencia en dBW para un consumo de energía de 100W?

Solución:

$$P_{\text{(dBW)}} = 10 \cdot \log_{10} (100\text{W} / 1\text{W}) = 20\text{dBW}$$

Cómo convertir potencia en dBW a dBm.

$$P_{\text{(dBm)}} = P_{\text{(dBW)}} + 30$$

Por ejemplo: ¿cuál es la potencia en dBm para un consumo de energía de 20 dBW?

Solución:

$$P_{\text{(dBm)}} = 20\text{dBW} + 30 = 50\text{dBm}$$



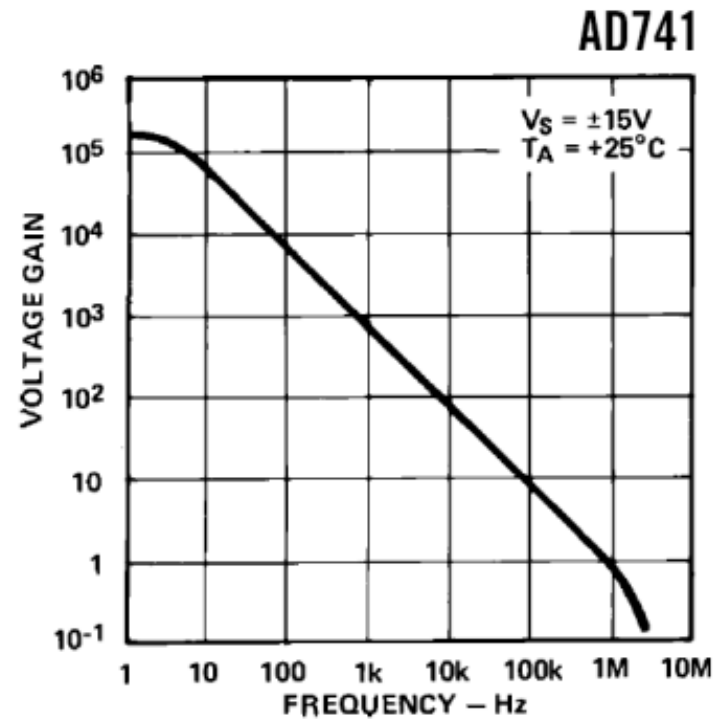
Potencia (dBW)	Potencia (dBm)	Potencia (Watt)
-50 dBW	-20 dBm	10 $\mu$ W
-40 dBW	-10 dBm	100 $\mu$ W
-30 dBW	0 dBm	1 mW
-20 dBW	10 dBm	10 mW
-10 dBW	20 dBm	100 mW
-1 dBW	29 dBm	0,794328 W
0 dBW	30 dBm	1.000000 W
1 dBW	31 dBm	1,258925 W
10 dBW	40 dBm	10 W
20 dBW	50 dBm	100 W
30 dBW	60 dBm	1 kilovatio
40 dBW	70 dBm	10 kilovatios
50 dBW	80 dBm	100 kilovatios

## RESPUESTA FRECUENCIAL

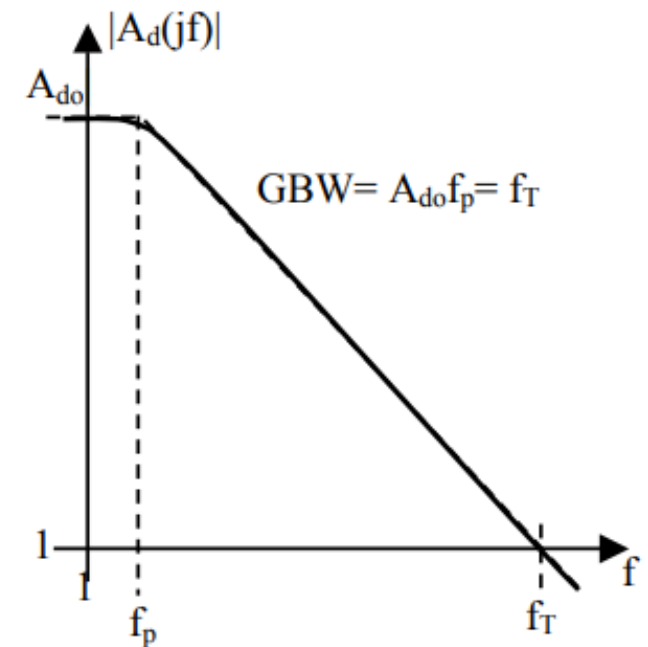
La función de transferencia que corresponde a la ganancia diferencial de un amplificador operacional es una función de paso bajo, con una ganancia en continua muy alta (100 a 120 dB).

Los fabricantes diseñan esta función de transferencia con dos objetivos: o Garantizar una anchura de banda suficiente en el amplificador. o Garantizar la estabilidad del amplificador cuando se encuentra realimentado.

En el caso de amplificadores de baja frecuencia, en los que la anchura de banda no es crítica, los fabricantes diseñan la respuesta frecuencial buscando la estabilidad bajo cualquier realimentación resistiva.



*Open-Loop Gain vs. Frequency*



Parámetro	Familia ADA4805	Familia ADA4896
Ruido de voltaje	5.9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ a 100 kHz	1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Ruido de corriente	6.0 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	28 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Voltaje de compensación de entrada	125 $\mu\text{V}$	500 $\mu\text{V}$
Deriva de voltaje de compensación	0.2 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	0.2 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Corriente de polarización	550 nA	-11 $\mu\text{A}$
Deriva de la corriente de polarización	430 nA/ $^{\circ}\text{C}$	3 nA/ $^{\circ}\text{C}$
Ancho de banda	105 MHz	230 MHz
Velocidad de respuesta	160 V / $\mu\text{seg}$	120 V / $\mu\text{seg}$
Tecnología de proceso	Bipolar complementario patentado (XFCB)	Bipolar SiGe

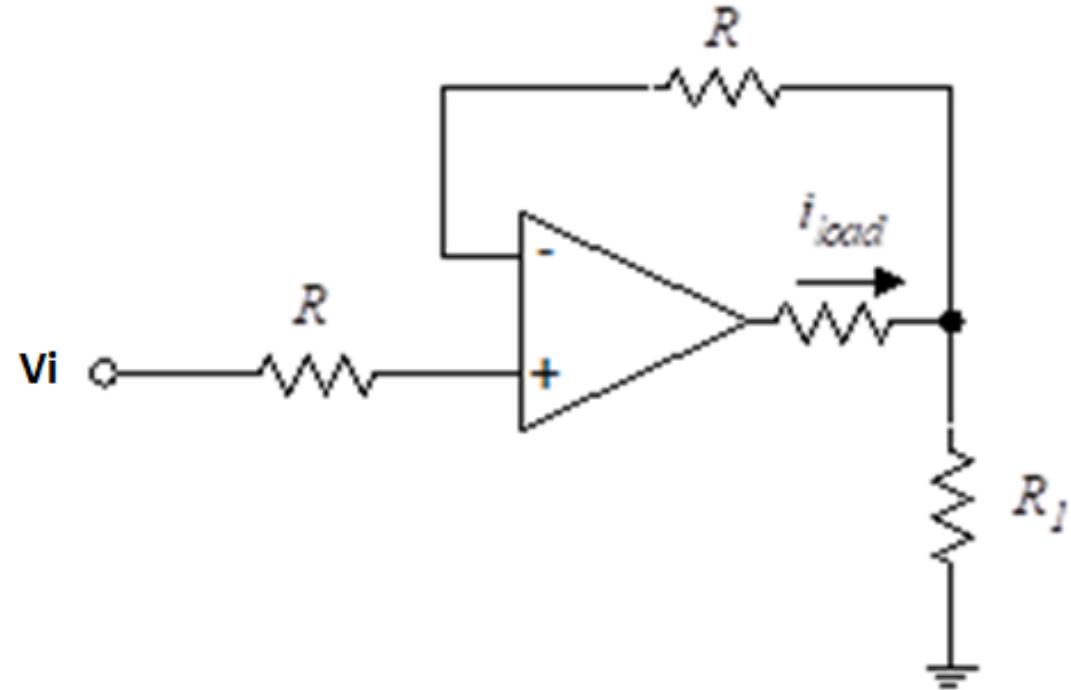
# APLICACIONES DE AMPLIFICADORES OPERACIONALES - TEMAS AVANZADOS

## CONVERTIDOR DE VOLTAJE A CORRIENTE DE PRECISIÓN

$$V_i = V_p = V_n$$

$$V_n = i_{load} \cdot R_1$$

$$i_{load} = V_n / R_1 = V_i / R_1$$



Por lo tanto, la corriente de carga es proporcional a la tensión aplicada,  $V_i$ .

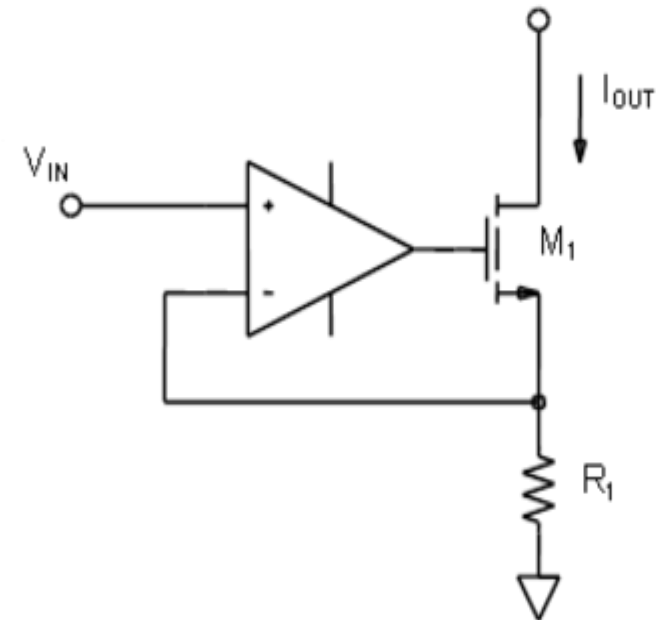
Este circuito desarrolla una fuente de corriente controlada por voltaje.

# CONVERTIDOR DE VOLTAJE A CORRIENTE DE PRECISIÓN

La muy alta ganancia directa ( $A_{VOL}$ ) y la naturaleza de entrada diferencial del amplificador operacional se pueden usar para crear una fuente de corriente controlada por voltaje casi ideal o un convertidor de V a I.

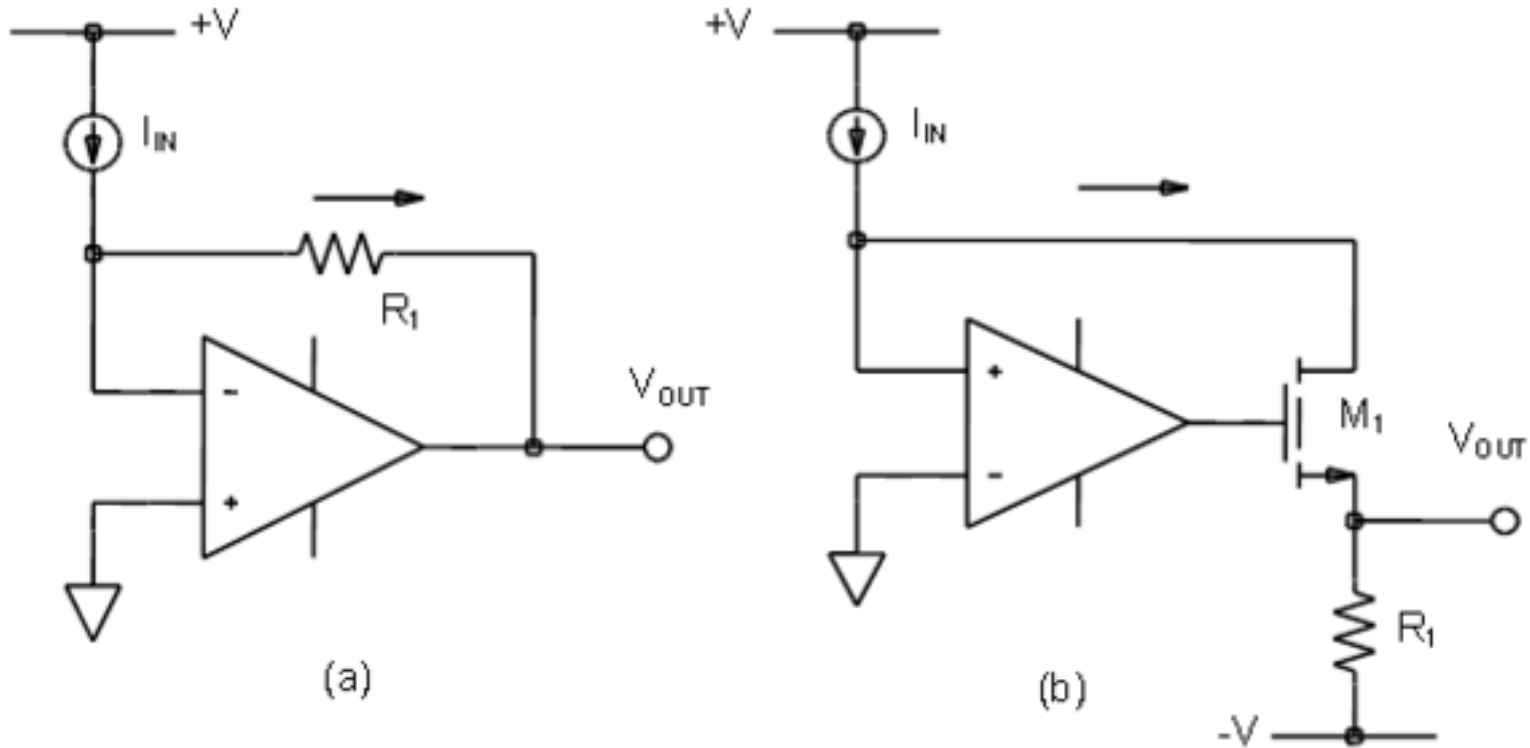
Tenga en cuenta que en la figura, el voltaje de entrada que se convertirá se aplica a la terminal de entrada no inversora del amplificador operacional. El terminal de entrada inversora está conectado en retroalimentación a un extremo de la resistencia  $R_1$  y al terminal fuente del transistor  $M_1$ .

La salida del amplificador operacional impulsa la puerta del transistor. La alta ganancia de bucle abierto del amplificador forzará a la puerta de  $M_1$  al voltaje requerido de modo que  $V_{IN}$  aparezca en  $R_1$ . La corriente en  $R_1$  será entonces  $V_{IN}/R_1$  y fluirá solo en la terminal Fuente de  $M_1$  y también aparecerá en el Drenaje de  $M_1$  como  $I_{OUT}$ .



$$I_{OUT} = V_{IN} / R_1$$

## CONVERTIDOR DE CORRIENTE A VOLTAJE DE PRECIÓN



Hay una ventaja en usar un MOSFET,  $M_1$ , sobre un transistor bipolar. En el MOSFET, toda la corriente en el drenaje también fluye en la fuente (sin corriente en la puerta), mientras que en el caso de un BJT, la corriente del emisor aumenta debido a la corriente base. La corriente en  $R_1$  será entonces ligeramente mayor que  $I_{IN}$  y el voltaje  $V_{OUT}$  no será exactamente igual a  $I_{IN} * R_1$ .

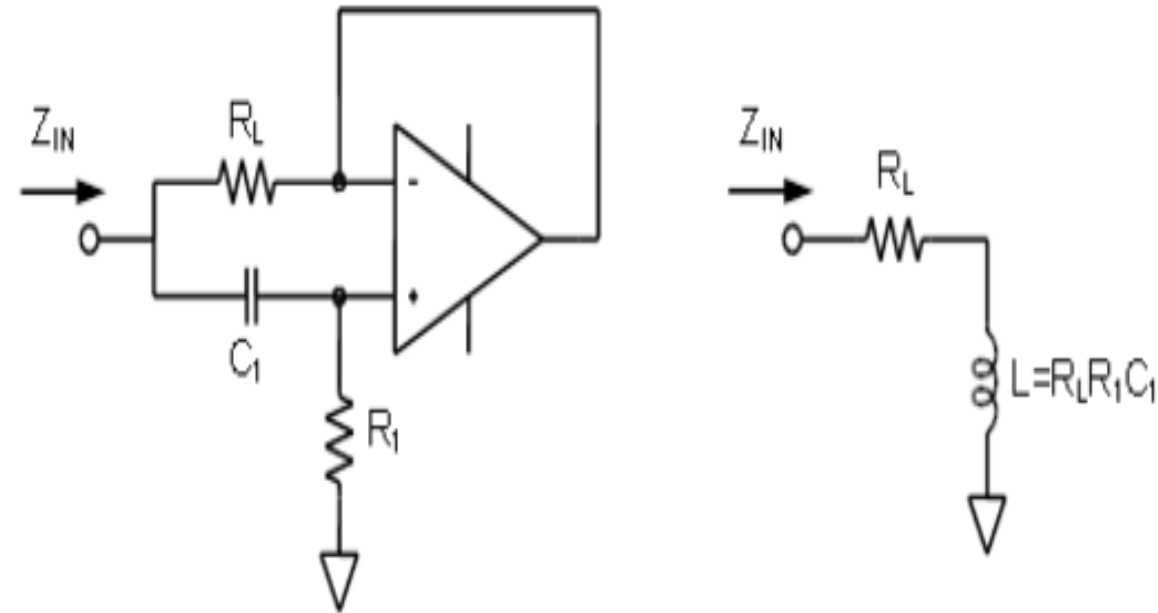
# INDUCTOR SIMULADO

Un inductor se puede simular por un condensador, amplificador operacional o un transistores y resistencias.

Esto es especialmente útil en la tecnología de circuitos integrados donde la construcción de inductores a partir de grandes bucles de cable no es práctica.

A medida que  $C_1$  se carga a través de  $R_1$ , el voltaje en  $R_1$  cae, por lo que el amplificador operacional extrae corriente de la entrada a través de  $R_L$ . Esto continúa a medida que se carga el condensador y, finalmente, el amplificador operacional tiene una entrada y una salida cerca de la tierra virtual porque el extremo inferior de  $R_1$  está conectado a tierra.

Cuando  $C_1$  está completamente cargado, la resistencia  $R_L$  limita el flujo de corriente y esto aparece como una resistencia en serie dentro del inductor simulado.

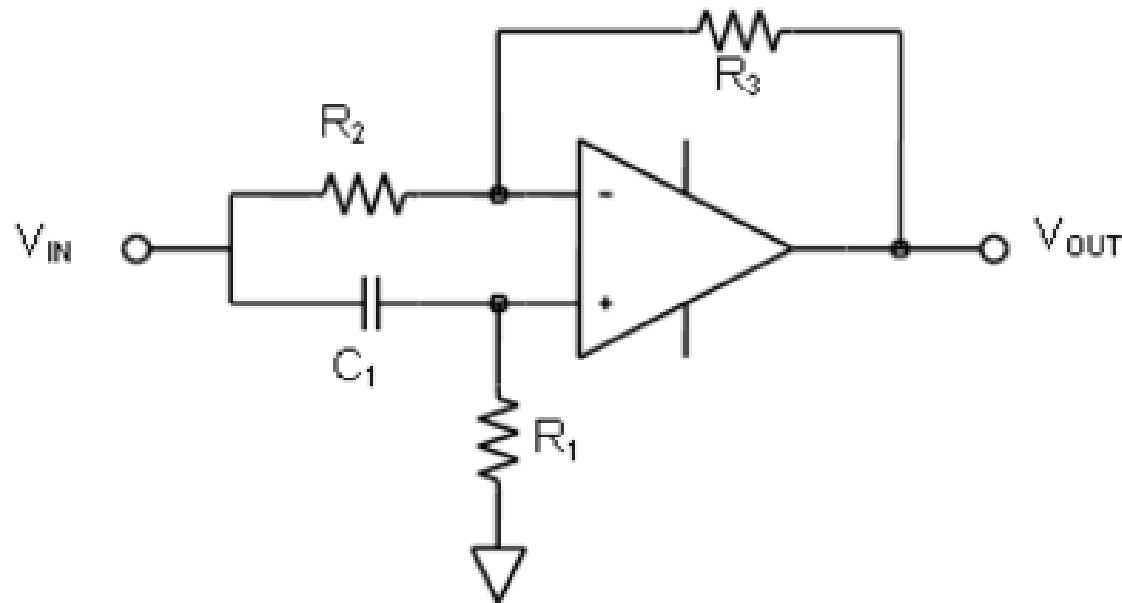




## FILTRO DE PASO TOTAL

Se utiliza para cambiar la fase de la señal y también se puede utilizar como circuito de corrección de fase. El circuito que se muestra en la figura tiene un cambio de fase de  $90^\circ$  en  $F(90^\circ)$ .

En CC, el cambio de fase es de  $180^\circ$  y en altas frecuencias es de  $0^\circ$ .  $R_1 = R_2 = R_3 = R$   $F(90^\circ) = 1/(2\pi R C_1)$

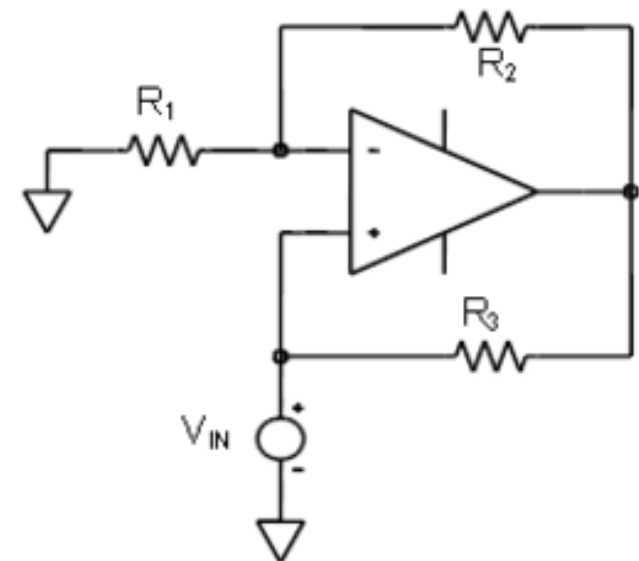


## CONVERTIDOR DE IMPEDANCIA NEGATIVA

El convertidor de impedancia negativa (NIC) es un circuito de amplificador operacional que actúa como una carga negativa. Esto se logra introduciendo un cambio de fase de  $180^\circ$  (inversión) entre el voltaje y la corriente para una fuente de señal. Hay dos versiones de este circuito: con inversión de voltaje (VNIC) y con inversión de corriente (INIC). El circuito básico de un INIC y su análisis se muestra en la figura

Este circuito se puede utilizar para cancelar una resistencia positiva no deseada. Muchas aplicaciones de osciladores dependen de un circuito de op-amp de resistencia negativa. La resistencia de entrada,  $R_1$ , es la relación entre la tensión de entrada y la corriente.

$$R_{in} = \frac{\Delta V_{in}}{I_{in}} = -R_3 \frac{R_1}{R_2}$$

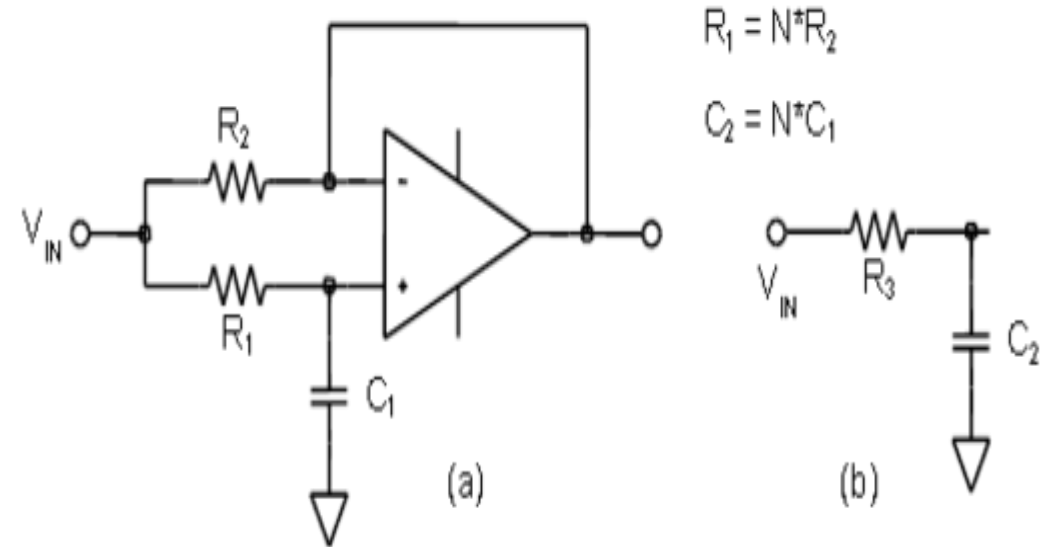


# MULTIPLICADOR DE CAPACITANCIA

El circuito de la figura usa un amplificador operacional y un capacitor pequeño,  $C_1$ , para simular un capacitor mucho más grande. Simula el circuito RC; la resistencia  $R_2$  es del mismo tamaño que la resistencia del circuito que se está simulando ( $R_3$ ), pero el capacitor  $C_1$  es  $N$  veces más pequeño que  $C_2$ .

La corriente fluye desde la fuente de entrada a través de  $R_1$  al capacitor ( $C_1$ ). Si  $R_1$ , por ejemplo, es 100 veces más grande que  $R_2$ , hay 1/100 de la corriente a través de él hacia el capacitor.

Para un voltaje de entrada dado, la tasa de cambio en el voltaje en  $C_1$  es la misma que en el  $C_2$  equivalente en la figura 4.8 (b), pero  $C_2$  parece tener 100 veces la capacitancia para compensar 1/100 de la corriente.



# GATILLO SCHMITT DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

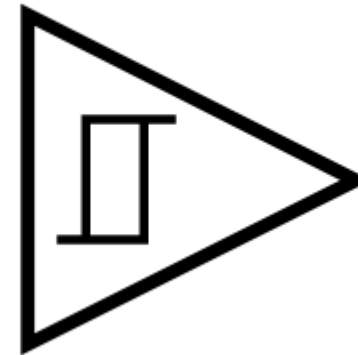
El disparador Schmitt es un circuito ampliamente utilizado con un comparador para proporcionar inmunidad al ruido y reducir la posibilidad de múltiples conmutaciones causados por el ruido en la entrada, permitirá reducir los errores producidos por señales ruidosas.

Fue inventado por un científico estadounidense llamado Otto Schmitt. El disparador Schmitt cambia a diferentes voltajes dependiendo de si se está moviendo de bajo a alto o alto a bajo, empleando lo que se llama histéresis. Todos los disparadores Schmitt utilizan este símbolo.

Trigger Schmitt

<https://www.youtube.com/watch?v=2Ra9tpJ3xvA&t=10s>

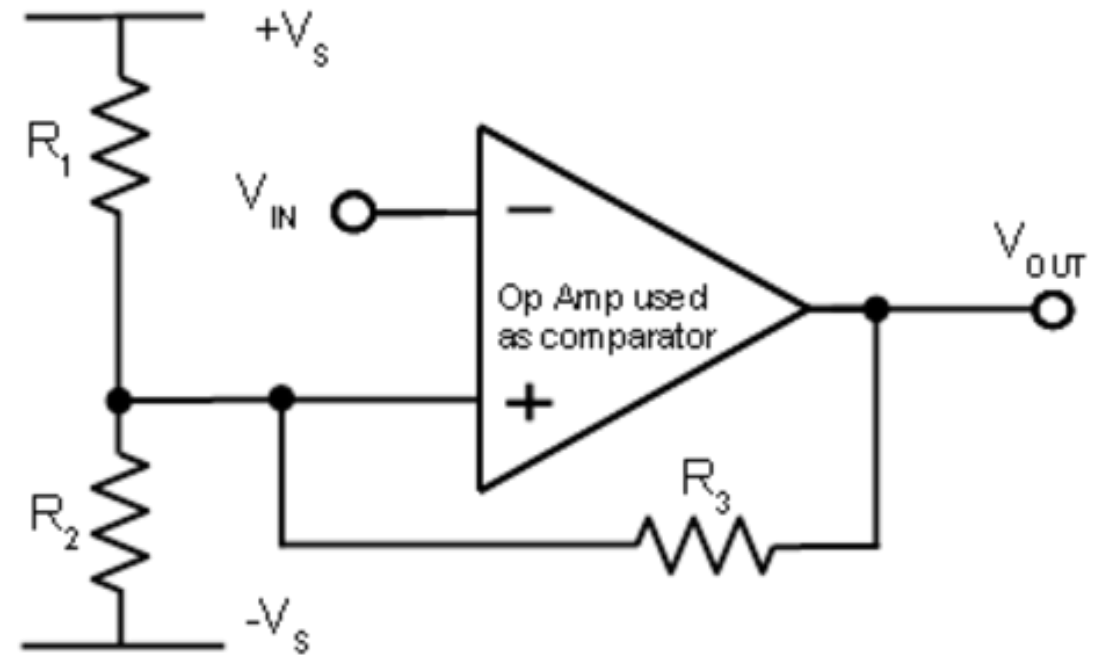
<https://www.youtube.com/watch?v=OSBK-0yrcKc>



El circuito de la imagen se conoce como disparador Schmitt.

El divisor de resistencia  $R_1$  y  $R_2$  establecen el voltaje de comparación en la entrada no inversora del amplificador operacional.

El voltaje central alrededor del cual cambiará el circuito está determinado por el divisor de voltaje que consta de  $R_1$  y  $R_2$ . Esto debe ser elegido primero. Entonces se puede calcular la resistencia de realimentación  $R_3$ . Esto proporcionará un nivel de histéresis que es igual a la oscilación de salida del amplificador operacional reducida por el divisor de voltaje (atenuación) formado como resultado de  $R_3$  y la combinación en paralelo de  $R_1$  y  $R_2$ . Cuanto mayor sea el valor de  $R_3$  con respecto a  $R_1 || R_2$  cuanto menor sea la histéresis, o la diferencia entre los dos niveles de umbral.



## APLICACIONES DEL SCHMITT TRIGGER

Un disparador Schmitt se utiliza en una serie de aplicaciones donde es necesario detectar un nivel.

- ***Conversión digital a analógica:*** El disparador Schmitt es un convertidor analógico-digital de un bit. Cuando la señal alcanza un nivel determinado, pasa de un estado a otro. Esto puede utilizarse para controlar otros circuitos digitales.
- ***Detección de nivel:*** El circuito de disparo Schmitt es capaz de proporcionar detección de nivel. Al realizar esta aplicación, es necesario tener en cuenta la tensión de histéresis durante el diseño del circuito electrónico para que el circuito conmute en la tensión requerida.
- ***Recepción de línea:*** al ejecutar una línea de datos que puede haber captado ruido en una puerta lógica, es necesario asegurarse de que un nivel de salida lógica solo se cambia a medida que cambian los datos y no como resultado de un ruido espurio que se puede haber recogido. El uso de un disparador Schmitt permite ampliamente que el pico de ruido máximo alcance el nivel de la histéresis antes de que pueda producirse una activación espuria.

TABLA COMPARATIVA DE OPERACIONALES REALES

Tipo	Vcc	Icc	Vio	Ib	Iomax	R2R	Av	Ft	SR	Vn	In
Bipolar básico LM741	±15	1.7	2	80	25	no	2E5	1	0.5	30	?
BiFet básico LF356	±15	5	1	.03	25	no	2E5	4.5	12	15	0.01
CMOS básico TLC2272	±5	2.2	0.3	.001	3	out	1.5E3 (mA/V)	2.2	3.6	9	.001
BiFet rápido OPA656	±5	16	0.3	.002	70	no	1E3 RL=100	230	290	7	.0013
CMOS rápido OPA354	±2.5	5	2	.003	100	In & out	3E5	250	150	6.5	.05
Bipolar CFOA AD8002	±5	5	2	3E3(+) 5E3(-)	70	no	900 kΩ	600	1.2k	2	.002(+) .018(-)
	V	mA	mV	nA	mA			MHz	V/μs	nV/√Hz	pA/√Hz

<https://www.electronicoscaldas.com/es/31-amplificadores-operacionales>

# PROYECTO FINAL

Se sugiere un tema del siguiente link

<http://www.electronica2000.com/varios-circuitos-electronicos/>