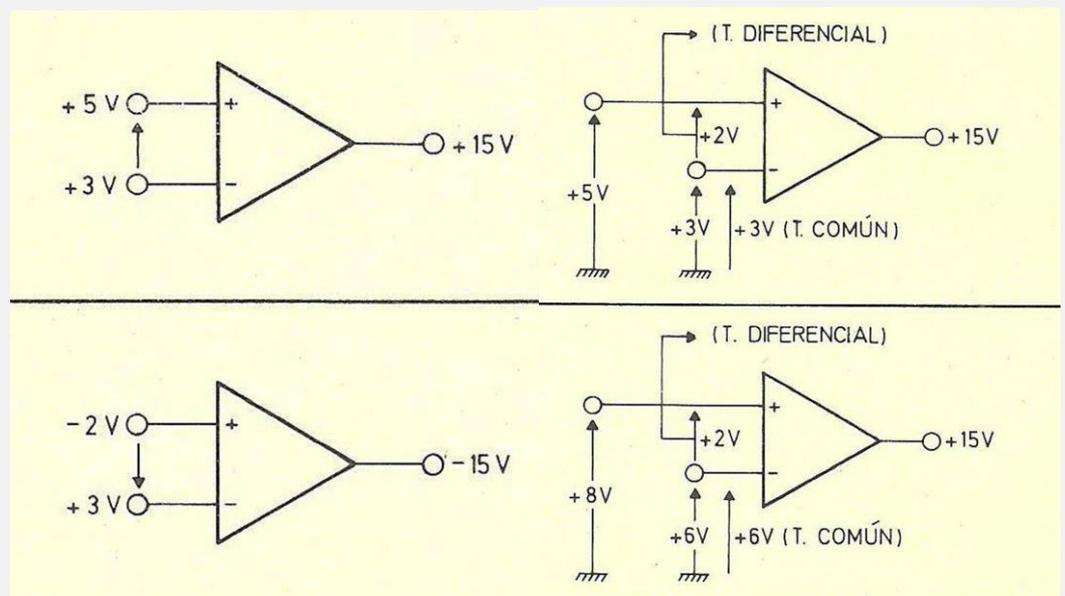
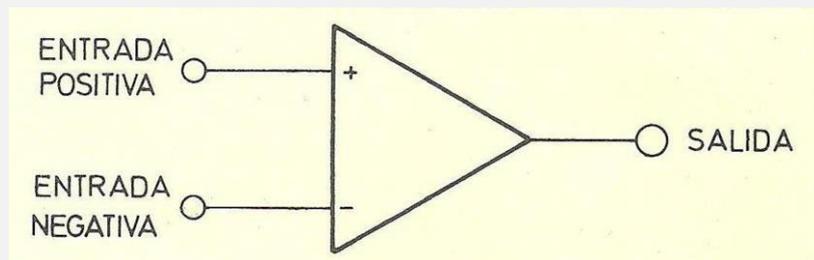


# Amplificadores operacionales

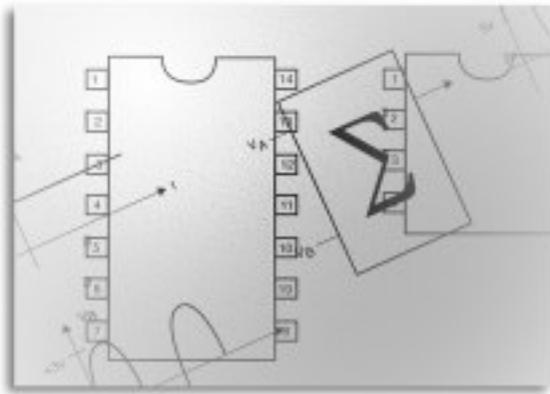
*Leyes, dispositivos y circuitos*



# AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Primera de dos parte

Oscar Montoya y Alberto Franco



*El presente artículo está dedicado a describir las principales características de operación de los circuitos amplificadores operacionales. Estos dispositivos, de los más populares en la electrónica, son conocidos como opamp por la contracción de su nombre en inglés; son de bajo costo y, puesto que no es necesario conocer la circuitería interna, facilitan la realización de proyectos; además, cuando se cometen errores en su cableado, no pueden ser dañados porque disponen de circuitos internos de autoprotección.*

## El amplificador operacional

George Philbrick, uno de los inventores del amplificador operacional, es también promotor de su aplicación. El primer amplificador operacional, diseñado solamente con un tubo de vacío, apareció en el mercado en el año de 1948.

Las primeras versiones de amplificadores operacionales fueron utilizadas para la construcción de computadoras analógicas. El uso de la palabra operacional se refería a operaciones matemáticas, ya que con estos dispositivos se pueden efectuar diversos cálculos: suma, resta e incluso derivadas e integrales (dichas operaciones se aplican en señales eléctricas, como observamos en la figura 1).

## Operaciones con señales y bloques funcionales

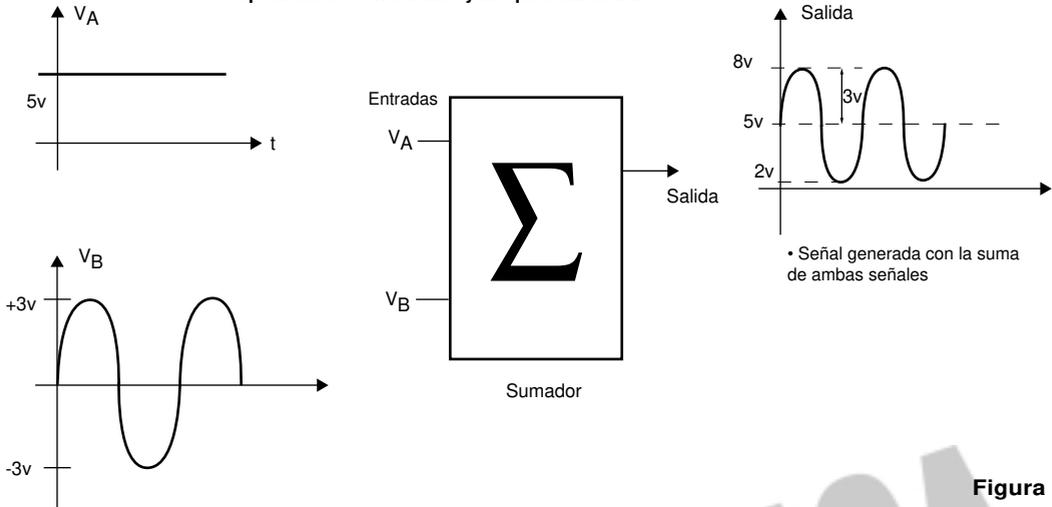


Figura 1

En el diseño electrónico se ha encontrado que existen ciertas etapas o circuitos que se utilizan frecuentemente; y las etapas amplificadoras no son la excepción. En vez de la tediosa y difícil tarea de realizar un amplificador con transistores, los diseñadores podían servirse del amplificador operacional y algunos elementos externos (principalmente resistencias); en aplicaciones especiales de derivación o integración, se emplean capacitores.

El costo de los amplificadores operacionales es generalmente bajo, excepto el de aquellos que se destinan a aplicaciones específicas; por ejemplo, para altas frecuencias o proceso de señales de audio. Pero siguen siendo muy accesibles, si se considera que con un circuito integrado como éstos se reducen las posibilidades de falla en el diseño final, además de que ocupan menos espacio y requieren menos potencia que los componentes discretos.

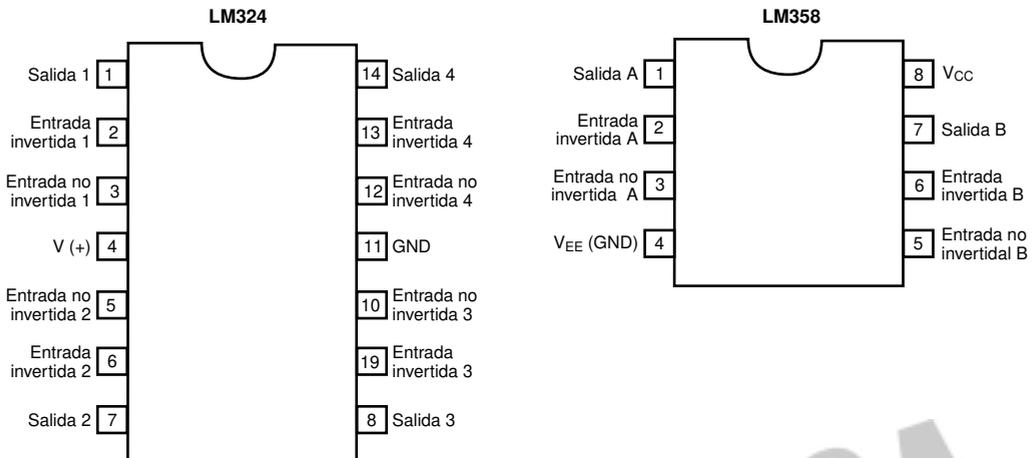
Por lo que acabamos de señalar, se comprende que estos dispositivos tengan tantas aplicaciones que van desde servir para la comparación y la mezcla (suma) de dos señales, hasta ser parte de equipos complejos de medición para la obtención de señales en equipos industriales; y, por supuesto, no podemos olvidar su uso en circuitos de generación de señales o detección de niveles de voltaje.

## Desarrollo tecnológico de los amplificadores operacionales

Conforme el desarrollo de la tecnología, la fabricación de los amplificadores operacionales se ha ejecutado con mayor precisión; básicamente, han mejorado considerablemente en dos aspectos:

1. Algunos transistores de unión (juntura) bipolar se sustituyeron con transistores de efecto de campo (FETs). Con la incorporación del amplificador operacional, los JFETs toman corrientes muy pequeñas y permiten que los voltajes de entrada varíen entre los límites de la fuente de alimentación (característica muy importante para la aplicación de estos dispositivos). Por su parte, los transistores MOS empleados en circuitos de salida permiten que la salida se aproxime a milivolts de los límites de la fuente de poder.
2. Gracias a la tecnología que se usa para la fabricación de circuitos integrados, pudo darse la segunda innovación: la invención de los encapsulados de doble y cuádruple amplificador. En el mismo encapsulado de 14 terminales ocupado por un solo amplificador operacional, los diseñadores decidieron fabricar cuatro amplificadores individuales que com-

Figura 2



parten la misma fuente de poder; el LM324 es un ejemplo muy conocido del tipo de amplificador cuádruple, y el LM358 del tipo de amplificador doble (figura 2).

Entonces se desarrollaron los circuitos integrados de función especial que contienen más de un amplificador operacional, para llevar a cabo funciones complejas.

En los manuales proporcionados por cada fabricante aparece información sobre amplificadores operacionales cuyas características particulares sirven para aplicaciones muy específicas. Entre dichas propiedades, podemos citar las siguientes:

- La capacidad de manejar alta corriente, alto voltaje o ambos.
- Sirven como amplificadores múltiples.
- Sirven como amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales.
- Sirven como amplificadores de ganancia programable.
- Se usan para instrumentación.
- Sirven como amplificadores para comunicaciones.
- Sirven como amplificadores operacionales especiales para el manejo de señales de audio y video.

### El amplificador de propósito general 741

Al igual que cualquier otro dispositivo electrónico, el amplificador operacional tiene un símbolo que lo identifica (figura 3).

Símbolo del amplificador operacional

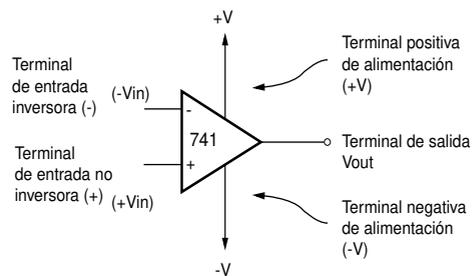


Figura 3

Puesto que es sólo un símbolo genérico, puede variar ligeramente de acuerdo con cada variante de la que se trate. Ejemplo de ello, es el símbolo con que se identifica a los circuitos lógicos y a los amplificadores operacionales; de modo que para evitar confusiones entre la representación de un *buffer* y la de un amplifica-

dor operacional, el símbolo de este último se modifica (figuras 4A y 4B, respectivamente).

También es común, sobre todo en diagramas esquemáticos de aparatos electrónicos domésticos, que se haga referencia a estos circuitos integrados de la misma forma en que se hace con los que conforman propiamente al aparato (IC1, IC2, etc.); es decir, se indica más bien el número consecutivo de integrado dentro del aparato, que la matrícula específica.

Después, el número que identifica a cada pieza se pone en la lista de partes del esquema del circuito.

Todos los amplificadores operacionales poseen por lo menos cinco terminales:

1. De fuente de poder positiva (VCC o +V).
2. De fuente de alimentación negativa (VEE o -V).
3. De salida.
4. De entrada inversora (-).

Algunas modificaciones al símbolo de acuerdo con el contexto

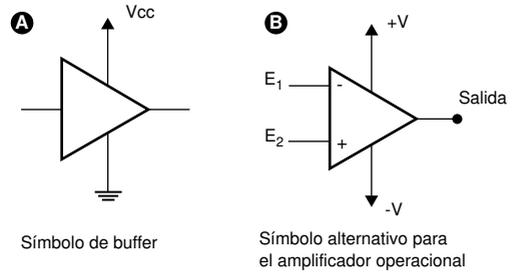


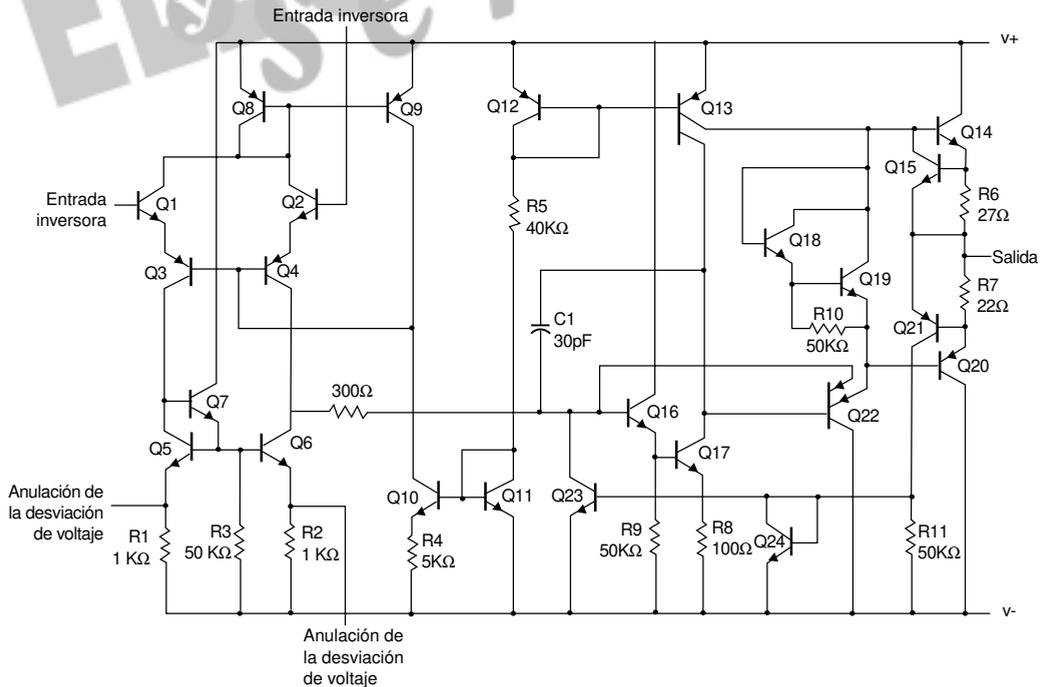
Figura 4

5. De entrada no inversora (+).

Algunos amplificadores operacionales de propósito general cuentan con más terminales especializadas (como la terminal de *offset*, para referenciar cero).

Figura 5

Circuito equivalente de un amplificador operacional 741. (Cortesía de Fairchild Semiconductor).



El circuito equivalente del amplificador operacional 741 se muestra en la figura 5. Es un circuito complejo, compuesto por 1 capacitor, 11 resistencias y 27 transistores.

### Descripción del encapsulado

El amplificador operacional se fabrica en un sustrato de silicio, y se coloca en diferentes encapsulados que pueden ser de metal, plástico o cerámica. La pastilla de silicio (que contiene todos los componentes del amplificador operacional) se conecta mediante alambres -generalmente de oro- con las terminales externas; a su vez, éstas son conectadas con los componentes externos.

En la figura 6 podemos ver los tipos de encapsulados más comunes que se pueden encontrar en el mercado; el más popular es el DIP de 8 pines.

Si revisamos desde arriba este tipo de encapsulados, encontraremos una muesca o un punto que identifica a la pata 1. Las terminales están numeradas en sentido contrario al de las manecillas del reloj.

A continuación explicaremos cómo puede determinarse la compra de un amplificador operacional específico, y daremos algunas recomendaciones acerca de las técnicas básicas para su conexión.

### Identificación del tipo de amplificador operacional

La matrícula del *chip* nos indica no sólo el tipo de componente de que se trata, sino también otras de sus características particulares; por ejemplo:

- Nombre del fabricante.
- Rangos de temperatura.
- Tipo de encapsulado (que si bien físicamente puede resultar obvio, es un dato muy importante para cuando se busca la matrícula en los manuales).

Cabe mencionar que no todos los fabricantes utilizan el mismo código, pues la mayoría se sir-

### Tipos de encapsulados comunes en los amplificadores operacionales

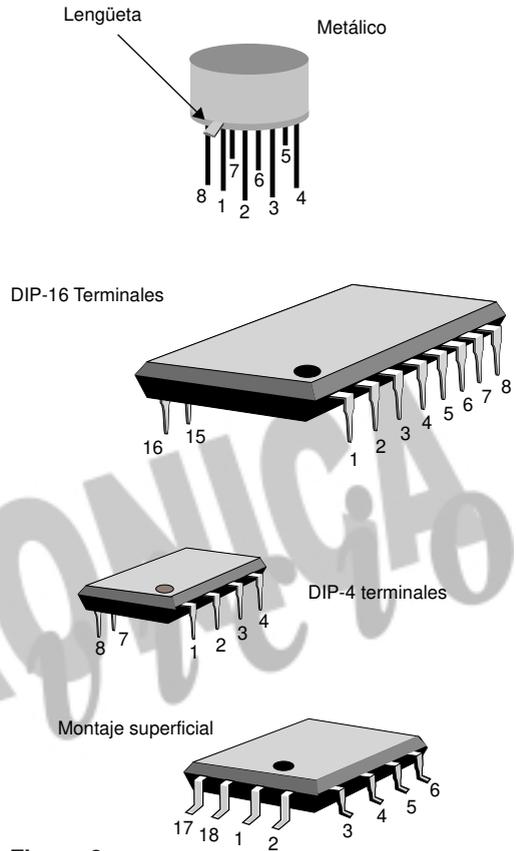


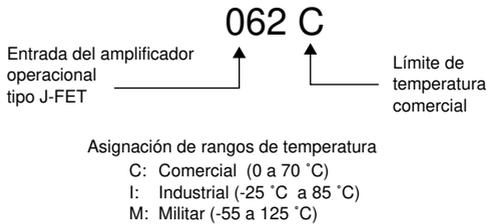
Figura 6

ve de un código de identificación que consta de cuatro partes escritas en el siguiente orden:

1. Prefijo de letras. Este código consiste por lo general en dos letras que identifican al fabricante; por ejemplo AD = Analog Devices, CA = RCA, LM = National Semiconductor Corp., TL = Texas Instruments.
2. Número del circuito. El número del circuito está formado por tres a siete números y letras que identifican el tipo de amplificador operacional y su intervalo de temperatura (figura 7).
3. Sufijo de letras. El sufijo de una o dos letras sirve para identificar el tipo de encapsulado

### Código de identificación para el amplificador operacional

Figura 7



que contiene al *chip* del amplificador operacional.

Para obtener las conexiones correctas de las patas de la hoja de especificaciones, es preciso conocer el tipo de encapsulado específico. En la tabla 1 presentamos los tres códigos de sufijos más comunes para encapsulados.

Tabla de encapsulados

Código de encapsulado	Descripción
D	Doble en línea de plástico para montaje superficial
J	Doble en línea de cerámica
N.P.	Doble en línea para inserción en la tablilla de circuito impreso

Tabla 1

4. Código de especificación militar. Se emplea exclusivamente para piezas destinadas a aplicaciones que requieren gran contabilidad.

En la figura 8 ejemplificamos la descripción completa de una matrícula que viene impresa en un amplificador operacional.

En la práctica, el uso de los amplificadores operacionales exige seguir ciertas reglas para el mejor desarrollo experimental:

1. Realice todo el cableado, una vez que haya apagado la fuente.

- Procure que el alambrado y los conductores de los componentes queden lo más corto posible.
- Conecte primero las alineaciones + V y - V del amplificador operacional.
- Trate de conectar todos los conductores de tierra a un punto de unión, el común de la fuente de poder. Este tipo de conexión recibe el nombre de “tierra en estrella“. No use un cable de tierra, porque podría provocar un lazo de tierra y generar entonces un voltaje de ruido indeseable.
- Verifique nuevamente el alambrado, antes de aplicar corriente al amplificador operacional.
- Conecte voltajes de señal al circuito, siempre y cuando el amplificador operacional tenga corriente.
- Haga todas las mediciones de tierra. Si, por ejemplo, una resistencia está conectada entre dos terminales de un circuito integrado, no debe conectarse un medidor ni un osciloscopio (de rayos catódicos) a las terminales de la resistencia; lo que tiene que hacer es medir el voltaje en un lado de la resistencia y después en el otro, así como calcular la caída del mismo.
- En lo posible, no utilice amperímetros. Mida el voltaje según como se indica en el paso anterior, y calcule la corriente.
- Desconecte la señal de entrada antes de quitar la corriente directa; si no lo hace, puede provocar la destrucción del circuito integrado.
- Usted ya sabe que estos circuitos integrados son muy resistentes al mal uso. Así que nunca:
  - Invierta la polaridad de las fuentes de poder.

Figura 8

### Descripción de una matrícula completa para un amplificador operacional



- b) Conecte las terminales de entrada del amplificador operacional por arriba o por abajo de los potenciales en la terminal +V ni en la terminal -V.
  - c) Deje conectada la señal de entrada sin corriente en el circuito integrado.
11. Si se presentan oscilaciones indeseables en la salida a pesar de que las conexiones del circuito parecen correctas:
- a) Conecte un capacitor 0.1uF entre la terminal +V del amplificador operacional y tierra, y otro capacitor de 0.1 pfd entre la terminal -V del amplificador operacional y tierra.
  - b) Acorte los alambres o conductores.
  - c) Verifique los alambres de tierra del instrumento de prueba, del generador de señal, de la carga y de la fuente de poder; deberán juntarse en algún punto.
12. Los principios anteriores se aplican a todos los demás circuitos integrados lineales.

## Características básicas de los amplificadores operacionales

### Descripción funcional de las terminales del amplificador operacional

Las terminales etiquetadas como +V y -V, sirven para identificar las terminales del amplificador

operacional que deben conectarse a la fuente de poder bipolar (figura 9).

### Terminales de salida

La terminal de salida del amplificador operacional está conectada a un extremo de la resistencia de carga RL; el otro extremo de RL está conectado a tierra (con respecto a ésta se mide el voltaje de salida  $V_o$ ).

Y a la única terminal de salida con que cuenta un amplificador operacional, se le llama “salida de extremo único“. Pero existe un límite para la corriente que puede tomarse de esta terminal (por lo común, de 5 a 10 mA) y para los niveles de voltaje en ella (los cuales se determinan básicamente mediante voltajes de alimentación).

### Terminales de entrada

En la figura 9 apreciamos dos terminales de entrada, etiquetadas como (-) y (+). Se denominan “terminales de entrada diferencial“, porque el voltaje de salida  $V_o$  depende de la diferencia de voltaje entre ellas ( $V_d$  voltaje diferencial) y de la ganancia del amplificador (AOL).

La terminal de salida es positiva con respecto a tierra, cuando a su vez la entrada (+) es positiva respecto a, o mayor a, la entrada (-). Cuando  $E_d$  se encuentra invertida, la entrada (+) es negativa respecto a, o menor a, la entrada (-) y  $V_o$  se vuelve negativo respecto a tierra.

Es importante mencionar que la polaridad  $V_o$  depende únicamente de la diferencia en voltaje entre las entradas inversora y no inversora.

### Polarización del amplificador operacional

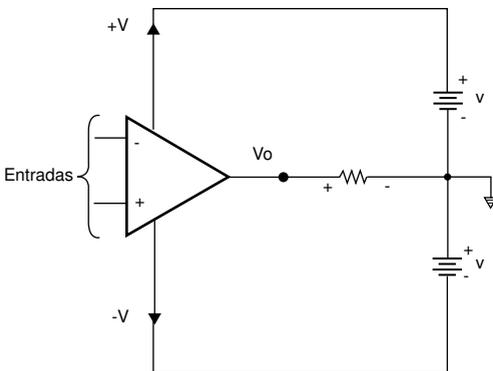


Figura 9

### Corrientes de entrada y desviación de voltaje (offset)

Para activar los transistores internos, las terminales de entrada de los amplificadores operacionales toman corrientes diminutas de polarización y de señal.

Además, dichas terminales presentan un pequeño desequilibrio (denominado “voltaje de desviación de entrada“,  $V_i$ ).

### Ganancia de voltaje

La salida de voltaje ( $V_o$ ) está determinada por  $E_d$  y por la ganancia de voltaje a circuito abierto (AOL).

AOL se denomina “ganancia de voltaje en lazo abierto”, porque precisamente se han dejado abiertas las posibles conexiones de retroalimentación desde la terminal de salida a las terminales de entrada.

El valor de AOL es excesivamente grande (con frecuencia, 200,000 ó más. Por su parte,  $V_o$  nunca puede exceder los voltajes de saturación positivo o negativo  $+V_{sat}$  y  $-V_{sat}$ .

Para una fuente de  $+15\text{ V}$ , los voltajes de saturación estarán alrededor de  $+13\text{ V}$ . En consecuencia, para que el amplificador operacional actúe como un amplificador,  $E_d$  debe limitarse a un voltaje máximo de  $+65\text{ uV}$

$V_o$  puede estar ya sea en uno de los límites  $+V_{sat}$  o  $-V_{sat}$ , u oscilando entre éstos. Tal comportamiento es típico en un amplificador de alta

ganancia. Para mantener a  $V_o$  dentro de dichos límites, hay que recurrir a un circuito de retroalimentación que lo obligue a depender de elementos estables como las resistencias y los capacitores.

## Aplicaciones

Entre las muchas aplicaciones que se dan a los amplificadores operacionales, podemos mencionar las siguientes:

- Circuitos comparadores.
- Circuitos de muestreo y retención.
- Convertidores analógico/ digital y digital/ analógico.
- Aplicaciones industriales.
- Circuitos de audio, radio y TV.

De entre ellas, destaca el uso que se da al amplificador operacional como comparador. Esto lo describimos enseguida.

### Comparadores de voltaje

Son circuitos que comparan el valor de dos voltajes analógicos de entrada, y que producen una salida igual al 1 ó 0 lógico cuando los voltajes son iguales, mayores o menores entre sí o con respecto a un voltaje de referencia.

Dado que el *opamp* se emplea con bastante frecuencia como comparador de voltaje, el símbolo que se emplea para identificarlo con esta aplicación es el mismo que el de su versión tradicional (figura 10).

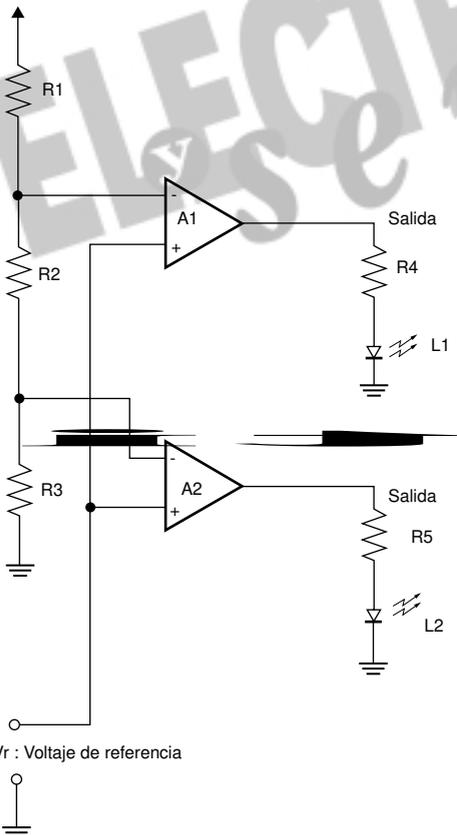
### Conclusión

En la segunda y última parte de este artículo presentaremos algunas de las aplicaciones más comunes de los amplificadores operacionales, pero por lo que se refiere a las diferentes etapas de los aparatos de audio o video -que son con los que el lector seguramente está más familiarizado.

**Finaliza en el próximo número**

**Figura 10**

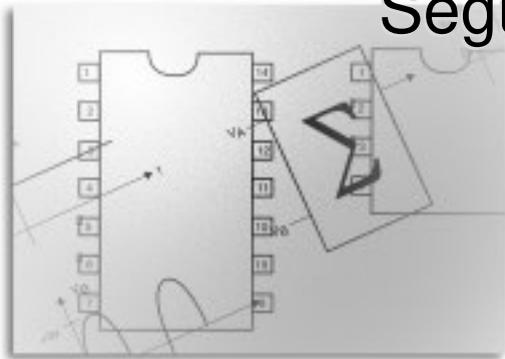
**El amplificador operacional como comparador**



# AMPLIFICADORES OPERACIONALES

## Segunda y última parte

Oscar Montoya y Alberto Franco

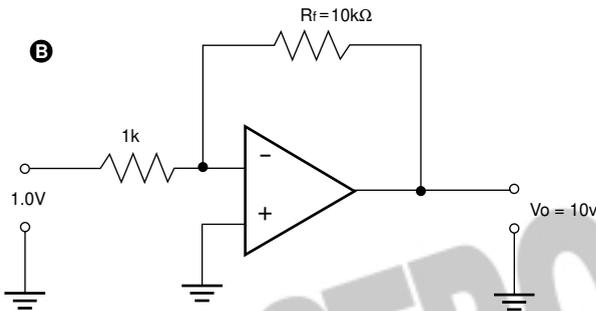
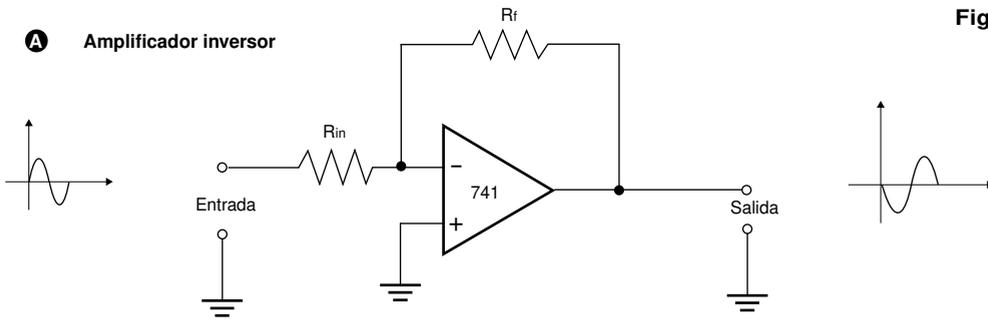


*Como conclusión de este tema que iniciamos en el número anterior, hablaremos ahora de las diferentes aplicaciones que se pueden dar a los amplificadores operacionales en equipos electrónicos comerciales; mas no debe olvidarse que el uso de estos circuitos se extiende a todas las ramas de la electrónica.*

### Aplicaciones

Procesar la información que contienen las señales eléctricas, es la finalidad de la electrónica; para ello se han creado diversos dispositivos; y a pesar de que en la actualidad la tecnología converge hacia los equipos digitales, no han dejado ni dejarán de utilizarse señales analógicas; por lo tanto, se requiere de dispositivos que las manejen.

Desde la invención del transistor y su aplicación como amplificador, los investigadores se dieron a la tarea de desarrollar dispositivos capaces de ampliar sus características. En este sentido, uno de los mayores logros ha sido sin duda alguna el amplificador operacional (*opamp*); se trata –como mencionamos en el número anterior– de un dispositivo muy versátil, que precisamente por esto puede encontrarse en casi cual-



La ganancia del amplificador se puede obtener mediante la siguiente relación:

$$A_v = - \frac{R_f}{R_{in}} = \frac{-10k\Omega}{1k\Omega} = -10$$

por lo que  $V_o = 10v$  entrada

quier equipo electrónico; y seguramente hasta en equipos especializados, para la adquisición de datos (estamos hablando de equipos que con ayuda de transductores convierten y acondicionan señales analógicas muy pequeñas –del orden de los milivolts–, hasta entregar en su salida señales amplificadas –del orden de varios volts).

### Circuitos con amplificadores operacionales

Como rasgos prácticos, un *opamp* tiene dos terminales de entrada y una terminal de salida. Una señal aplicada en la entrada inversora, origina una salida de polaridad opuesta; la señal de entrada en la terminal no inversora, origina una salida que tiene la misma polaridad que la entrada.

En general, se utiliza la retroalimentación entre la señal de salida y una de las terminales de entrada, con el fin de estabilizar la ganancia. La retroalimentación disminuye la ganancia, pero aumenta el ancho de banda del amplifica-

dor; mientras más se reduzca la ganancia, mayor será el aumento del ancho de banda.

#### Amplificador inversor

La configuración que se muestra en la figura 1A, es la de un amplificador inversor. Nótese el uso de un resistor de retroalimentación ( $R_f$ ) y de un resistor de entrada ( $R_{in}$ ).

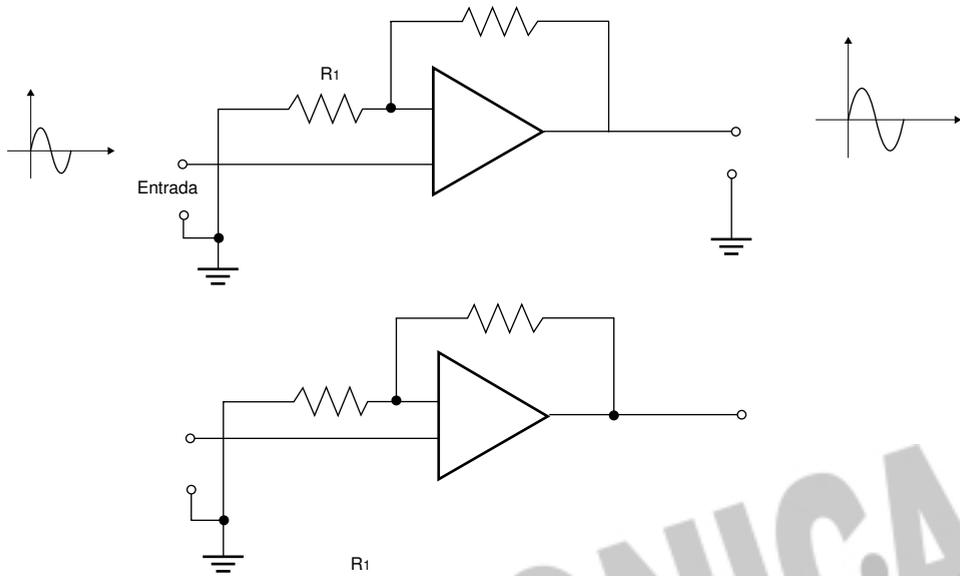
La señal se aplica a la entrada inversora (–) del amplificador. La señal de entrada, aparece en la salida amplificada e invertida.

La ganancia en voltaje del *opamp*, depende del valor del resistor de entrada ( $R_{in}$ ) y del de retroalimentación ( $R_f$ ).

En la figura 1B, se indica un método sencillo para calcular la ganancia en voltaje  $A_v$  del amplificador.

#### Amplificador no inversor

En la figura 2 se muestra un circuito no inversor que utiliza un *opamp*. Nótese que la señal de entrada se aplica en la terminal no inversora (+); sin embargo,  $R_f$  y  $R_1$  siguen conectadas.



Las ondas muestran que, aunque la señal de entrada se amplifica, no sufre ninguna inversión de polaridad. En este caso, se dice que las señales de entrada y salida están «en fase».

### Aplicaciones de los amplificadores operacionales

#### *Circuitos de muestreo y retención*

Estos circuitos integrados se utilizan para «muestrear» una señal analógica de entrada. La muestra del voltaje de entrada se «congela» durante breve lapso, mientras su valor se almacena en un capacitor externo. Durante este intervalo, el voltaje de entrada se encuentra desconectado; y el que permanece «congelado» en el capacitor, constituye la salida hacia otro dispositivo –tal como un convertidor A/D– para su procesamiento.

En la figura 3 vemos el esquema correspondiente a un circuito muestreador-retenedor, de matrícula LM198, junto con un capacitor de retención externo. El LM198 toma una muestra del voltaje analógico de entrada, cuando la señal lógica de entrada es 1; también retiene el voltaje y, cuando la entrada lógica es 0, lo almacena en

el capacitor que está conectado en su terminal de salida.

#### *Convertidores A/D y D/A*

Un convertidor digital/analógico (convertidor D/A) integrado, convierte una entrada digital (binaria) en un voltaje cuya magnitud es proporcional al valor de la señal digital. Si, por ejem-