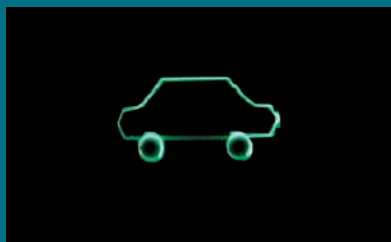




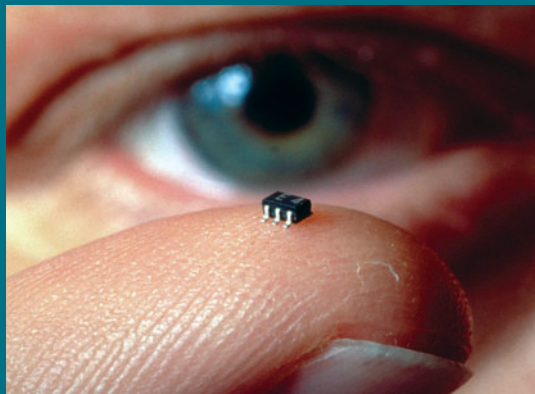
# Amplificadores operacionales



- Las computadoras de 1950 eran poco útiles para el cálculo, porque eran *analógicas*, y no digitales. Para resolver un problema mecánico, se armaba un circuito eléctrico de igual comportamiento matemático, y los valores de las fuerzas, o distancias, se sabían por la medición de tensiones, o corrientes. Las operaciones analógicas las hacían unos circuitos llamados *amplificadores operacionales*. En la foto, una computadora de esa época, que manejaba las estaciones compresoras de gas de la Southern Gas Association, en Texas, USA.



- Estudio de la amortiguación de un coche con una computadora analógica Telefunken RA 741, de 1956. Tenía 23 amplificadores operacionales: 8 integradores, 11 sumadores y 4 inversores; todos de triodos de vacío.

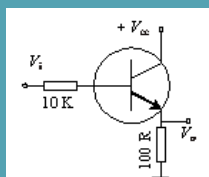


- Actualmente las computadoras son digitales: operan con números, y no con analogías eléctricas; y los amplificadores operacionales tienen otros usos. En la foto, el LMV321 de un teléfono celular.

# Amplificadores operacionales



- Amplificador operacional LM741CN, de 4 a 12 V, 500 mW; entrada hasta 0,4 V; ganancia 15.000, encapsulado DIP (dual in-line package, encapsulado dual en línea), de aproximadamente un centímetro de largo.



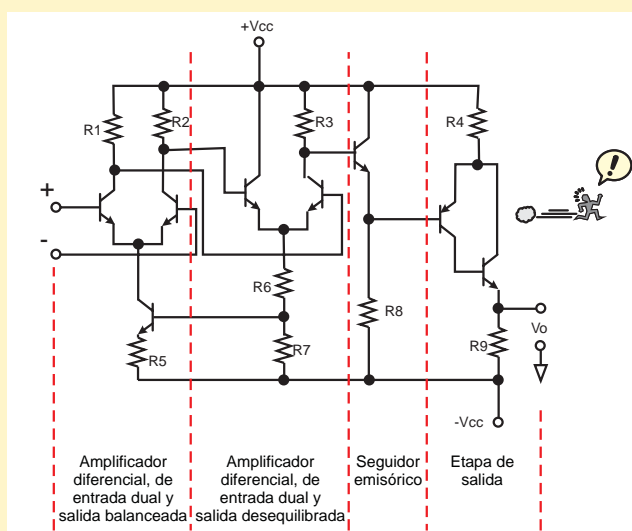
- Seguidor emisor. La tensión de entrada,  $V_i$ , es prácticamente igual a la de salida,  $V_o$ . Pero, a la salida hay más corriente disponible. Cuando entra un microampere a la base del transistor, la caída de tensión en el resistor de 10 kΩ es de 10 mV. Si el factor beta del transistor vale 100, para que la tensión de salida sufra la misma merma, se puede extraer una corriente cien veces mayor, 10 mA. Este circuito, que amplifica corriente pero no tensión, es similar al antiguo *seguidor catódico*, de triodos de vacío.

En los capítulos 11 y 13 se describieron algunos amplificadores de válvulas de vacío y de transistores, aplicados a diversos fines, por ejemplo el de convertir en sonido la señal de un micrófono, o el de encender automáticamente una lámpara cuando la luz del día deja de iluminar un fotorresistor. Esas funciones, y muchas más, se pueden hacer también con los amplificadores operacionales disponibles hoy en la industria.

Los amplificadores operacionales se inventaron para las ya obsoletas computadoras analógicas, pero su universalidad y facilidad de adaptación los hacen apropiados para cumplir muy diversas funciones, con sólo agregarles uno o dos resistores, o capacitores, según la aplicación.

Un amplificador operacional, abreviadamente AO, OA u *op-amp*, es un amplificador *diferencial*; esto es, amplifica la *diferencia*, o resta, entre dos tensiones eléctricas de entrada.

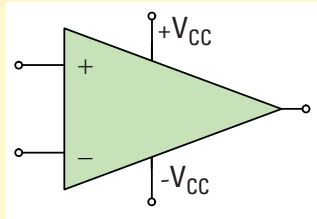
Sin ocuparnos, por ahora, de los detalles – que varían con los fabricantes y modelos – podemos ver en la figura, la composición interna de un amplificador operacional. Nótese que los símbolos de los transistores carecen de círculo, porque comparten el encapsulado.



Entre los puntos  $+V_{CC}$  y  $-V_{CC}$  se aplican, por ejemplo,  $+12\text{ V}$  y  $-12\text{ V}$  con respecto a tierra. A la izquierda,  $+$  y  $-$  son los contactos de entrada. A la derecha,  $V_0$  es la tensión de salida con respecto a tierra.

El circuito incluye un amplificador de entrada, uno adicional inmediato, un amplificador seguidor emisor, que permite obtener más corriente, y un cuarto amplificador a la salida. Esa división en etapas permite un mejor control, que el que se obtendría con sólo dos transistores.

## ● Símbolo del amplificador operacional



Es cómodo representar un amplificador operacional con un triángulo y cinco contactos. Dos de ellos son para la alimentación simétrica de tensión continua, por ejemplo  $+12\text{ V}$  y  $-12\text{ V}$  con respecto a tierra, o con respecto a un punto de referencia del circuito, aunque no esté a tierra. Los dos contactos de la izquierda son los de entrada; y el de la derecha, el de salida.

En vez de  $-V_{CC}$  y  $+V_{CC}$  se suele indicar, con más generalidad y sin el signo,  $V_{CC}$  y  $V_{EE}$ , que se interpretan como la tensión en los colectores y la tensión en los emisores, que son positiva y negativa, respectivamente, cuando los transistores del amplificador operacional tienen polaridad N, la más común.

Las entradas  $+$  y  $-$  se llaman, respectivamente, *entrada no inversora*, y *entrada inversora*. Los signos  $+$  y  $-$  son los nombres de las entradas, y no la polaridad verdadera de las tensiones que se les apliquen.

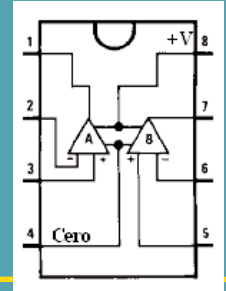
## ● Funcionamiento ideal

Las entradas tienen una resistencia muy elevada, idealmente infinita y, cuando se les aplica una tensión, no circula corriente, o ésta es insignificante.

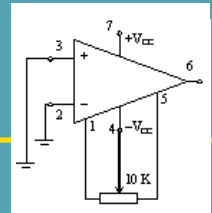
Cuando la entrada  $+$  está a un potencial eléctrico mayor que el de la entrada  $-$ , esto es, cuando  $+$  es positiva con respecto a  $-$ , el potencial de salida es de  $+12\text{ V}$ , o el valor positivo de la alimentación, si fuera diferente de  $12\text{ V}$ .

Cuando la entrada  $+$  se encuentra a un potencial eléctrico menor que el de la entrada  $-$ , esto es, cuando  $+$  es negativa con respecto a  $-$ , el potencial de salida es de  $-12\text{ V}$ , o el valor negativo de la alimentación, si fuera diferente de  $12\text{ V}$ .

Para que la salida sea siempre extrema positiva, o extrema negativa, no importa –idealmente– cuán pequeña sea la diferencia entre los potenciales de entrada. Pero



- Hay amplificadores operacionales que se alimentan con una sola tensión, y no con dos simétricas. En la figura, el componente LM358N, con dos op-amps en la misma cápsula. Tiene la ventaja de que se puede usar una sola batería como fuente, conectada entre  $+V$  y cero. Pero, naturalmente, la tensión de salida está siempre comprendida entre cero y  $+V$ .



- Ajuste de cero de un amplificador operacional. Con las dos entradas a tierra, se ajusta el resistor variable, o potenciómetro, hasta que la tensión de salida sea nula. Después se eliminan las conexiones a tierra, y se usan normalmente las entradas.

en la práctica, la sensibilidad del circuito es limitada y, por eso, no responde a diferencias de potencial muy pequeñas.

Los amplificadores operacionales más comunes detectan diferencias de potencial de algunas millonésimas de volt.

Ya se ha dicho qué sucede cuando entre los contactos de entrada hay una tensión positiva o negativa. ¿Y si la diferencia de potencial entre + y - fuera nula? ¿Qué ocurre, en ese caso, con la salida? Lo que sucede en tal caso es que la tensión de salida mantiene el valor que tenía (intermedio entre extremos) cuando se dio la condición de igualdad de los potenciales de entrada.

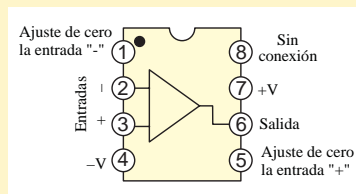
Tal como se ha descrito el funcionamiento ideal de un op-amp, su ganancia es infinita, puesto que alcanza con una diferencia arbitrariamente pequeña entre los potenciales de entrada, para que la tensión de salida salte de  $-V_{CC}$  a  $+V_{CC}$ , o al revés. Pero en la práctica la ganancia no supera en mucho un factor de cien mil.<sup>1</sup>

Además de los cinco electrodos principales (alimentación positiva, alimentación negativa, entrada no inversora, entrada inversora y salida), muchos op-amp tienen dos contactos adicionales para el ajuste de cero, más conocido por su nombre en inglés, *null offset*.<sup>2</sup> Ese ajuste compensa pequeñas asimetrías del circuito, que hacen que haya una pequeña tensión de salida en los casos en que, en teoría, esa tensión debería ser nula.

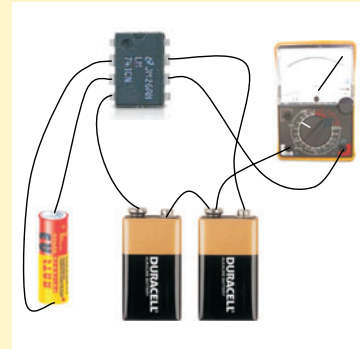
## • El ejemplo más sencillo: un comparador



- Antiguo amplificador operacional de válvulas de vacío, el K2-W, de 1953. El primer aparato de ese tipo se patentó 1941 como amplificador sumador. Tenía una ganancia de 95 decibeles (un factor de tres mil millones), medía unos diez centímetros de altura, y funcionaba con 360 V en placas.



- Circuito elemental de prueba (los tamaños no están en escala).



Para probar la función más elemental de un op-amp, se puede usar un LM741CN, dos baterías de 9 V para alimentarlo, una pila de 1,5 V para probar

<sup>1</sup> En el caso de los amplificadores (o de sus contrarios, los atenuadores), en vez de hablar del factor de amplificación (o de atenuación), se prefiere, por simplicidad, usar su logaritmo decimal. El logaritmo decimal de 100.000 vale 5, entonces la ganancia del amplificador es de 5 bel, o lo que es lo mismo, de 50 decibeles. (5 B = 50 dB)

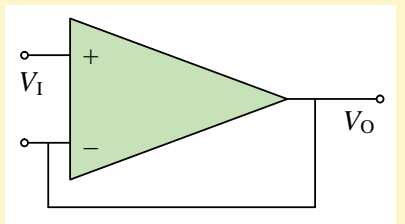
<sup>2</sup> Literalmente, corrimiento de cero.

la entrada, y un voltímetro. Cuando se conecta la pila con la polaridad indicada, el voltímetro marca +9 V. Si se invierte la conexión de la pila, la tensión que indica el voltímetro pasa a ser de -9 V. Si se quita la pila y se dejan sueltos los cables conectados a las patas 2 y 3 del amplificador, se verá cómo la aguja del instrumento tiembla. Eso sucede porque los cables sueltos captan la tensión alterna del ambiente. En los semiciclos negativos, el operacional se vuelca a +9 V de salida, y a -9V en los semiciclos positivos.

La indicación del voltímetro, con esa conexión, será siempre o bien +9 V, o bien -9 V, según que la pata 3 sea positiva o negativa con respecto a la pata 2.

Es difícil lograr que el voltímetro indique tensiones intermedias, o cero. Es suficiente con que haya veinte o treinta microvolt de diferencia de potencial entre los contactos de entrada, para que se obtenga una salida diferente de cero.

## ● Seguidor



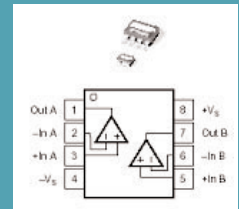
● En el circuito *seguidor*, la tensión de salida,  $V_O$  es, prácticamente, igual a la de entrada,  $V_I$ . No hay amplificación de tensión, pero sí la hay de corriente (los subíndices I y O para la entrada y la salida provienen del inglés, in y out).

Para comprender cómo funciona<sup>3</sup> el circuito seguidor, imaginemos que la tensión de salida,  $V_O$ , crece por alguna razón, por encima de  $V_I$ . Eso significa que la entrada inversora (-) es positiva con respecto a la entrada no inversora (+). En consecuencia, y de acuerdo con el funcionamiento básico del amplificador operacional, la tensión de salida tiene que adoptar el valor  $-V_{CC}$ , con lo cual deja de estar, obviamente, por encima de la tensión de entrada, como acabamos de suponer.

A la inversa, imaginemos que la tensión de salida cae por debajo de la de entrada. Eso significa que la entrada inversora (-) es negativa con respecto a la otra entrada (+). En consecuencia, la tensión de salida tiene que adoptar el valor +V, con lo cual deja de estar por debajo de la tensión de entrada, como dijimos.

La única forma de que los hechos no manifiesten ninguna de las dos contradicciones extremas mencionadas, es que la tensión de salida sea igual a la de entrada. En la práctica, hay una pequeña diferencia de veinte o treinta microvolt.

<sup>3</sup> En este desarrollo, para mayor claridad, y salvo que vengan muy al caso, omitimos representar la alimentación, el ajuste de cero, y la conexión de tierra.



- Los amplificadores operacionales de realimentación de corriente (CFB, *current feedback*) son similares a los ordinarios de realimentación de tensión, pero su resistencia de entrada es idealmente nula, en vez de ser idealmente infinita. Tienen ventajas en el rechazo del ruido en aplicaciones de alta frecuencia. En la imagen, el dual OPA2683, de hasta 110 mA de corriente de entrada.



● **HENRY LE CHÂTELIER Y HEINRICH LENZ.**

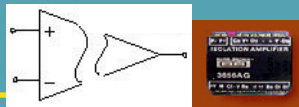
El principio de Le Châtelier, que establece que en una reacción química las concentraciones cambian de modo que se reduzca la velocidad de la reacción; y la ley de Lenz, que dice que la fuerza electromotriz inducida se opone a la variación de la corriente que la produce, son dos ejemplos de realimentación negativa.

● **Realimentación positiva y negativa**

Hay fenómenos en los que los efectos refuerzan las causas. Por ejemplo, alguien aprende un idioma, con eso puede empezar a leer libros de estudio escritos en la nueva lengua, con lo que aprende más; puede leer entonces obras más avanzadas, y así cada vez, y sin límite. Es un caso de *realimentación positiva*, donde la dificultad mayor es la de arranque.

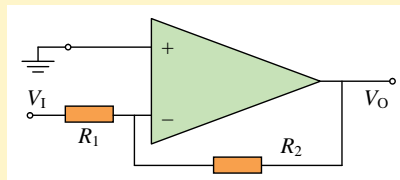
En otros procesos los efectos se oponen a las causas. Por ejemplo, alguien aprieta el acelerador del coche; aumenta la velocidad del vehículo, y la persona queda algo atrasada con respecto al coche; entonces pisa menos fuertemente el acelerador y, por eso, la velocidad no aumenta tanto como si manejara el coche por control remoto, desde un lugar fijo. Es un caso de *realimentación negativa*.

En las aplicaciones útiles de los amplificadores operacionales se usa la realimentación negativa, porque la positiva forzaría el componente hacia una salida plena, positiva o negativa. Nótese, en la figura anterior y en las que siguen, que la salida se conecta siempre a la entrada inversora, sea en forma directa como en el seguidor, o bien indirectamente, a través de resistores, u otros elementos.



● **Amplificador inversor**

En esta conexión, la salida está invertida con respecto a la entrada, y amplificada en un factor igual al cociente entre las resistencias de entrada y de realimentación,  $R_1$  y  $R_2$ , respectivamente.



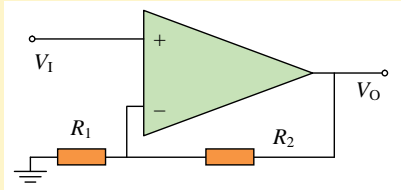
$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (1)$$

Para comprender el funcionamiento, es útil recordar que para que el op-amp entregue una tensión que no sea extrema, la diferencia de potencial entre sus entradas tiene que ser nula. Si tomamos el potencial de tierra como cero de referencia, las entradas + y - están, entonces, a potencial nulo. La tensión sobre  $R_2$  vale  $V_o$  y la tensión sobre  $R_1$  vale  $V_i$ . Como la entrada no toma corriente, la intensidad que circula por  $R_2$  hacia la izquierda, tiene que valer lo mismo que la que pasa por  $R_1$  hacia el mismo lado.

La corriente se calcula como el cociente entre la tensión y la resistencia. En-

tonces,  $(V_o - 0) / R_2$  vale lo mismo que  $(0 - V_1) / R_1$ , de lo que se deduce la fórmula (1).

## ● Amplificador sin inversión



$$V_o = \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_i \quad (2)$$

Con igual razonamiento, partimos del hecho de que las dos entradas están al mismo potencial y que, ninguna de las dos, toma corriente. Entonces, los resistores están en serie; la corriente que circula por ambos es la misma, y su valor es  $I = V_o / (R_1 + R_2)$ .

La tensión se calcula como el producto de la corriente por la resistencia; entonces, la tensión sobre  $R_1$  vale  $I \cdot R_1$ , o bien  $V_o \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ . Y como esta tensión tiene que ser igual a la de la otra entrada,  $V_1$ , se deduce la fórmula (2) que figura a la derecha del circuito.

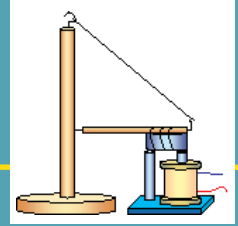
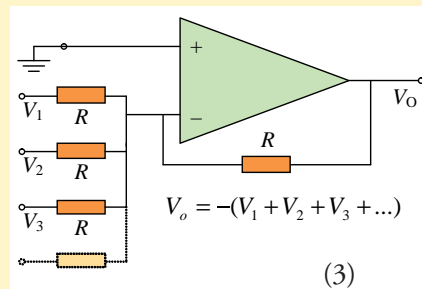
Ahora no hay inversión de polaridad, porque la señal de entrada se aplica a la entrada +, que no es inversora. El punto de unión entre los dos resistores se encuentra a un potencial intermedio entre el de salida, y el potencial cero de tierra.

Siguen más ejemplos de uso de amplificadores operacionales.

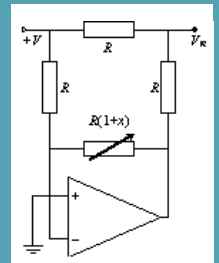
## ● Sumador con inversión

La tensión de salida es igual a la suma de las de entrada, pero con una inversión de la polaridad.

Un razonamiento posible para comprender el circuito, es considerar que los potenciales en + y en - son nulos, y las entradas no toman corriente. Entonces, la corriente que circula hacia la izquierda por el resistor de realimentación negativa ( $I = V_o / R$ ) vale lo mismo que la suma de las corrientes que circulan por los otros resistores R hacia el mismo lado. Y cada una de esas corrientes valen  $(0 - V_1) / R$ ,  $(0 - V_2) / R$ ;  $(0 - V_3) / R$ , etcétera; de lo que se deduce la fórmula (3) que está junto al circuito.



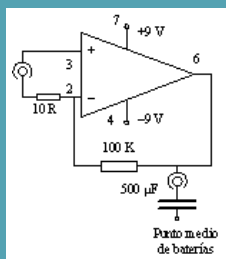
- La gran multiplicación que brinda un amplificador operacional tiene aplicaciones tan variadas, que algunas se descubrieron por azar. Si se le conecta a la entrada una bobina en cuya cercanía se desplace un imán suspendido, el dispositivo detecta vibraciones y movimientos, entre ellos los sísmicos.



- Uso de un op-amp para obtener una tensión directamente proporcional a la variación de una resistencia que forma parte de un circuito puente (por ejemplo, un fotorresistor). La tensión de salida,  $V_o$ , vale  $-V_s/2$ .

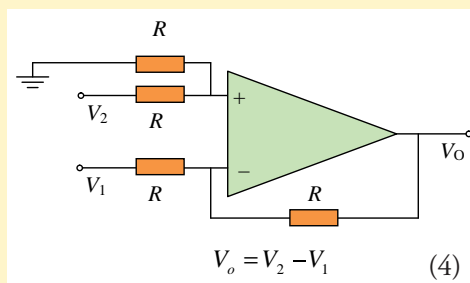


## ● Restador



- Sencillo amplificador de sonido, o de cualquier otra señal. Usa un op-amp LM741CN, dos baterías de 9 V, dos resistores y un capacitor que impide el paso de la corriente continua. Funciona con dos audífonos, uno de los cuales hace de micrófono. Se ha usado para detectar, con cables sumergidos, señales emitidas por peces eléctricos (carece de ajuste de volumen, que se le puede hacer con un resistor de 100 kΩ variable).

La tensión de salida del circuito,  $V_0$ , es igual a la diferencia entre las tensiones de entrada,  $V_2 - V_1$ . Para comprender el porqué sucede eso, consideremos que las entradas no toman corriente, entonces, los dos resistores de arriba están en serie, y el potencial de la entrada + es la mitad<sup>4</sup> de  $V_2$ . Ese potencial tiene que ser igual al de la otra entrada (de otro modo, el operacional se volcaría a una tensión extrema). Entonces, el potencial de la entrada inversora vale, también,  $V_2 / 2$ . Pero además, y si miramos la serie de abajo, ese potencial vale  $(V_0 - V_1) \cdot R / 2R + V_1$ ; esto es, la diferencia de potencial entre los extremos de la serie inferior, dividida por la resistencia de esa serie (hasta ahí tenemos la corriente que circula por ella), multiplicada por la resistencia del resistor de abajo a la izquierda (hasta ahí hemos obtenido la tensión en ese resistor), más la tensión  $V_1$ . De la igualdad  $V_2 / 2 = (V_0 - V_1) \cdot R / 2R + V_1$ , se deduce la fórmula (4) de la resta que acompaña ese circuito.



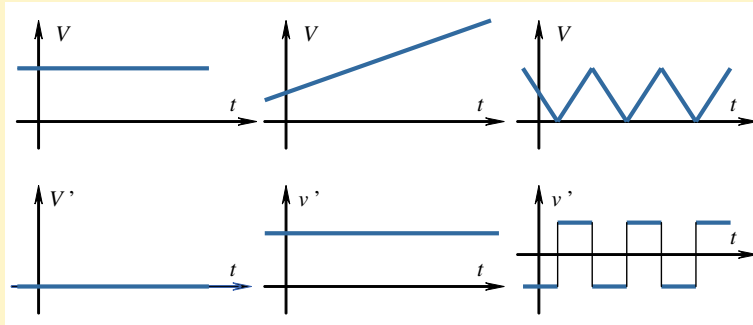
Si en los últimos ejemplos de sumador y restador, las resistencias fueran diferentes, en vez de ser iguales como se supuso por simplicidad, las fórmulas cambiarían; y eso es útil en algunas aplicaciones en las que se desea que en la suma, o en la resta, las cantidades que intervienen tengan influencias o pesos diferentes.

## ● Derivador, o diferenciador

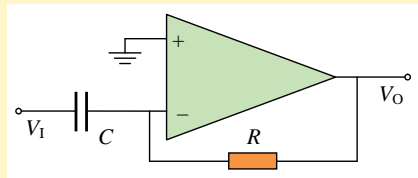
La derivada de una función matemática es otra función que indica cómo varía la primitiva. Si la primitiva es constante, la derivada vale cero; si en cambio crece, la derivada es positiva; y si la función primitiva decrece, la función derivada es, entonces, negativa. La figura que sigue muestra, arriba, tres funciones  $y(t)$  y abajo, sus respectivas tres derivadas<sup>5</sup>,  $y'(t)$ .

<sup>4</sup> Eso se deduce así: la corriente que circula por la serie, vale  $V_2 / (R + R)$ . Entonces, la tensión sobre cualquiera de esos dos resistores vale  $I \cdot R = V_2 \cdot R / (R + R)$ , o  $V_2 / 2$ .

<sup>5</sup> Por ejemplo, esas tres funciones podrían ser tensiones representadas en función del tiempo. En el tercer ejemplo, el de los gráficos de la derecha (pág. 185), se supone que los vértices de arriba están algo redondeados, para que la derivada cambie de valor en tiempos muy breves, pero no instantáneos, lo que se representa con segmentos casi verticales.



Para obtener la derivada de una tensión variable en el tiempo, se puede usar el siguiente circuito.



$$V_0 = -RC \frac{dV_1}{dt}$$

Una manera de comprender cómo funciona es observar que la entrada + está a tierra, entonces el potencial de la entrada - tiene que ser nulo también. Después imaginamos que la tensión  $V_1$  permanece constante durante mucho tiempo; eso hace que la corriente en el capacitor valga cero, ya que ese componente completó su carga, o su descarga. Entonces, la corriente en el resistor vale cero, y el potencial de salida,  $V_0$ , es igual al de la entrada +; cero. Y justamente, la derivada de una constante es cero. La expresión  $\frac{dV_1}{dt}$  se lee: *derivada de la tensión de entrada con respecto al tiempo*.

A continuación, pensemos que  $V_1$  aumenta progresivamente. Eso hace circular una corriente de carga hacia la derecha, lo que sólo es posible si  $V_0$  se hace negativa, ya que la tensión en + es nula. La tensión en el resistor es igual al producto de la resistencia por la corriente. Esa corriente de carga es proporcional a la capacitancia y a la tasa temporal de aumento de la tensión de entrada, que no es otra cosa que la derivada de la función.

Para derivar una función, el empleo de un amplificador operacional tiene límites prácticos. Si el capacitor es de gran capacitancia, si la resistencia de realimentación es también elevada, y surge una variación muy rápida de la tensión de entrada, entonces el op-amp se volcará a una tensión extrema,<sup>6</sup> y no distinguirá ese caso de otro en el que la derivada sea aún mayor.

<sup>6</sup> Se dice, cuando ocurre eso, que el amplificador operacional se satura.



- El circuito derivador se puede usar en los detectores pasivos de infrarrojo, para que actúen cuando la radiación que reciben varía con el tiempo, y no meramente cuando hay radiación, porque ésta existe siempre, emitida por las paredes y el suelo tibio. Si alguien se mueve muy lentamente delante de uno de esos detectores, el aparato no actúa.

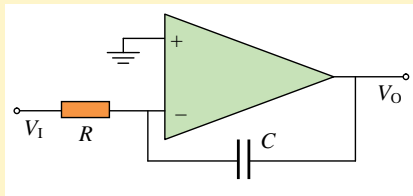
## ● Integrador

Integrar una función es la operación contraria a la de obtener su derivada. La integral de una función matemática  $y(t)$ , es otra función,  $z(t)$ , tal que la derivada de esta nueva función  $z(t)$ , es la función anterior,  $y(t)$ . En símbolos:

$$z(t) = \frac{dy(t)}{dt} \qquad y(t) = \int z(t)dt$$

Se lee:  $z$  es la derivada de  $y$  con respecto al tiempo, e  $y$  es la integral de  $z$  con respecto al tiempo.

Para integrar una función con un amplificador operacional, sirve el siguiente circuito:



$$V_o = V_{INICIAL} - \frac{1}{RC} \int V_i dt$$

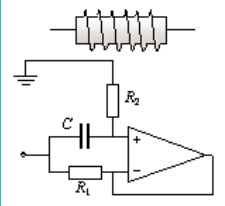
Si la tensión  $V_i$ , permanece nula, al cabo de bastante tiempo la corriente de carga (o de descarga) del capacitor será insignificante, y las dos entradas quedarán al mismo potencial nulo de tierra. La tensión de salida, en ese caso, será cualquier valor constante; por ejemplo, el que llegó a existir cuando se dio esa condición, y el mismo valor de tensión habrá ente los extremos del capacitor cargado.

Supongamos que esa tensión de salida es positiva, y de 10 V; que el resistor es de 1.000  $\Omega$ , y el capacitor, de 1.000  $\mu\text{F}$ , o lo que es lo mismo, 1  $\mu\text{F}$ . Puesto que la entrada  $-$  tiene potencial nulo, el capacitor queda cargado con una tensión de 10 V, con el positivo a la derecha.

Si, a partir de un cierto instante, la tensión  $V_i$  se aparta de cero, y permanece constante y positiva, por ejemplo 1 V, habrá una corriente de carga del capacitor, de valor inicial igual a 1 V / 1.000  $\Omega$ , ó 1 mA. Esa corriente hace cambiar la carga del capacitor.<sup>7</sup> Al cabo de un segundo, la carga transferida será de una milésima de coulomb, y la tensión del capacitor disminuirá en 1 mC / 1 mF = 1 V. El capacitor presenta, ahora, una tensión de sólo 9 V, cuando hace un segundo tenía 10 V.

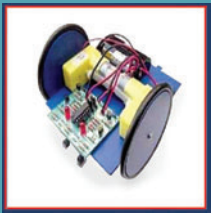
Como el potencial de la entrada del op-amp sigue nula, eso significa que la salida  $V_o$  tiene que haber cambiado de 10 V a 9 V.

<sup>7</sup> Recordemos la definición dada en el capítulo 1: Cuando una carga de un coulomb pasa de un sitio a otro en un tiempo de un segundo, se dice que circula una corriente de un ampere. Y tengamos presente, también, que la carga eléctrica es igual al producto de tensión por la capacitancia.



- El circuito de la figura simula un inductor, a pesar de que sólo tiene un capacitor y dos resistores (además del amplificador operacional). Desde la entrada, se comporta como una inductancia  $L = R_1 R_2 C$  en serie con una resistencia  $R_1$ .

Una característica de los inductores es que si se les aplica tensión, la corriente comienza a crecer desde cero, y se estabiliza en el valor  $I = U/R$ . Este circuito ocupa mucho menos lugar que un inductor real, de bobina.



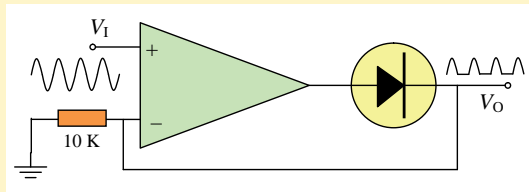
- Robot didáctico impulsado por un motor a pilas, que sigue una línea trazada en el suelo. Está hecho con un circuito integrado de varios amplificadores operacionales.

Si, transcurrido ese segundo, la tensión de entrada  $V_I$  volviera a valer cero, la tensión de salida se quedaría fija en 9 V. Si  $V_I$  volviera a valer 1 V,  $V_O$  volvería a decrecer, al ritmo de un volt por segundo. Y si la tensión de entrada adoptase otros valores, la de salida decrecería, o crecería, según la polaridad de la tensión de entrada, a un ritmo dependiente del valor de la tensión de entrada.

El límite práctico de este circuito integrador es la tensión de alimentación. Cuando el capacitor la alcanza, ya no puede seguir acumulando más carga, y el circuito deja de integrar.

## ● Rectificador de muy baja tensión

En el capítulo 12, página 141, se comentó que los diodos semiconductores comienzan a conducir sólo después de que se supera una tensión umbral de directa del orden de un volt; es imposible, entonces, sólo con esa clase de diodos, rectificar tensiones alternas menores, pero los amplificadores operacionales brindan una solución.

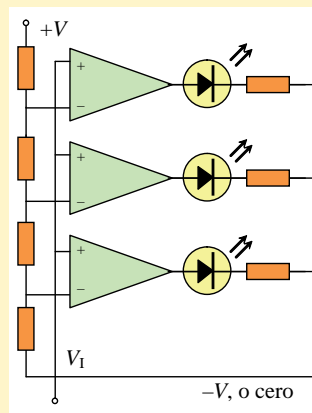


● Cuando la tensión de entrada es positiva, aunque sea pequeña, la salida crece hasta superar la tensión directa del diodo y, recién entonces, hay realimentación.

## ● Indicador de barras

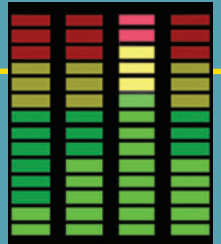
Para indicar diferentes niveles de tensión, temperatura, sonido, u otra variable, sin usar instrumentos costosos, son muy comunes los indicadores de barras. Se puede armar uno con el circuito de la figura; y si se usa el amplificador operacional LM324N, se aprovecha que tiene cuatro op-amp en la misma cápsula de 14 patas, para ocupar muy poco sitio.

La cadena de resistores polariza cada entrada inversora con una tensión diferente. A medida que aumenta la tensión de entrada  $V_I$ , y cada entrada directa supera el potencial de la entrada inversora, la salida de cada op-amp se vuelca al extremo positivo, y se enciende el led correspondiente. Si se desea la función inversa, se polarizan las entradas al revés.



- Antes de armar el indicador de barras descrito, conviene saber que hay integrados como el KA284, para 15 miliampere, y el KA285, para 7 mA, que ya vienen preparados para la función de indicar un nivel de sonido en una escala logarítmica, en decibelios.

Sirven para encender hasta cinco leds; se alimentan con una tensión de 3 a 16 V, y miden 23 × 6 × 6 mm.

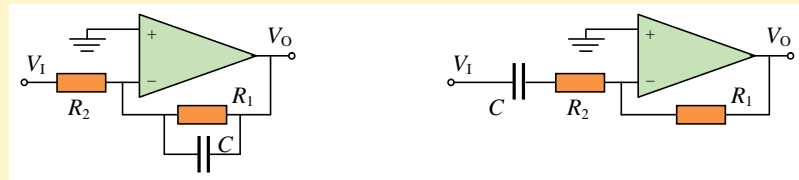


- Indicador de nivel de sonido, con cuatro barras de leds para tonos bajos, medios, altos y muy altos. Se lo conoce como *vúmetro* (de VU, unidad de volumen, en inglés). En algunos modelos baratos, los led encienden de a pares; o cada led asoma por dos ventanas, para que parezca que hay el doble de niveles.

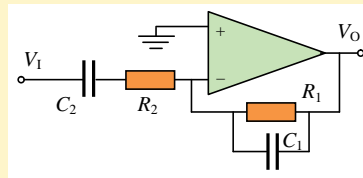
## ● Filtros

A veces hay que permitir el paso de la corriente de cierta frecuencia, e impedirlo si es de otra; por ejemplo para separar las señales cuando por una misma línea se envían la voz del teléfono, de una frecuencia entre 50 y 50.000 Hz, y el servicio de Internet de banda ancha, de más de 100.000 Hz.

Hay *filtros pasivos* que cumplen esa función, formados por resistores, capacitores e inductores. Los op-amp permiten construir *filtros activos*, llamados así porque necesitan de una fuente externa de energía; pero tienen la ventaja de que se puede hacer un mejor control. Según la frecuencia que dejan pasar, los filtros se llaman pasaaltos, pasabajos, pasabanda, etcétera.



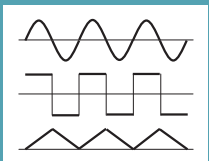
● Izquierda, filtro pasabajos; derecha, pasaaltos. La frecuencia límite, en hertz, vale, en el primer caso,  $1/(2\pi R_1 C)$ ; y en el segundo,  $1/(2\pi R_2 C)$ , con las resistencias expresadas en ohm, y las capacitancias en farad (F).



● Filtro pasabanda, de frecuencias límites  $1/(2\pi R_1 C_1)$ ; y en el segundo,  $1/(2\pi R_2 C_2)$ .

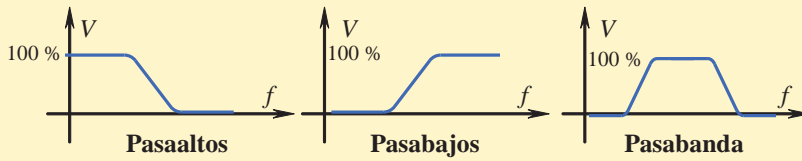
La diferencia entre las dos frecuencias límite es el ancho de banda. El cociente entre la frecuencia central y el ancho de banda se conoce como el factor Q, o factor de calidad del circuito. Cuanto más estrecha es la banda, mayor es el factor de calidad.<sup>8</sup>

Las frecuencias de límite no son nítidas ni estrictas; el filtro comienza a filtrar desde antes de alcanzarse el límite, y deja pasar algo de señal una vez transpuesto, como lo indican las siguientes figuras.



- Una de las muchas maneras de obtener una tensión variable en forma de onda dentada, a partir de una sinusoidal, es aplicar ésta a un comparador, y la salida del comparador, a un integrador.

<sup>8</sup> El factor Q de calidad se refiere a la cuán selectivo es un circuito para responder a una única frecuencia, o una banda estrecha alrededor de la frecuencia central. Es una calidad de sintonía. En cambio, cuando se habla de banda ancha para la conexión a Internet, lo deseable es que pasen simultáneamente frecuencias diversas, correspondientes a varios canales de comunicación simultáneos de los diferentes usuarios. En este otro contexto, la buena calidad del servicio consiste en que la banda de frecuencias de comunicación sea amplia, y no estrecha.



## PROPUESTAS DE ESTUDIO

**15.1.** (Advertencia- Esta pregunta presenta una dificultad para que la resuelvan los estudiantes, o para que disfruten si la descubren y no caen en ella.)

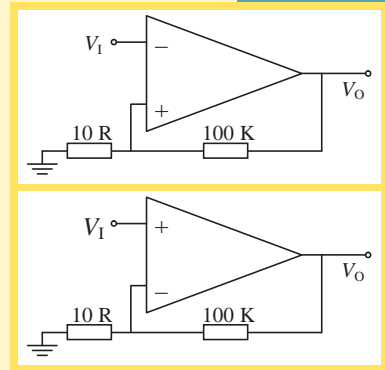
Se sabe como dato que en el op-amp de la figura, alimentado con  $+12\text{ V}$  y  $-12\text{ V}$ , la tensión de entrada vale  $V_1 = -0,001\text{ V}$ . ¿Cuánto vale la tensión de salida  $V_0$ ?

**15.2.** Con los mismos datos, ¿cuánto vale ahora la tensión de salida  $V_2$ ?

**15.3.** ¿Y si  $V_1$  valiera  $0,003\text{ V}$ ?

**15.4.** ¿Cómo harían un sumador de tensiones sin inversión de la polaridad? Justificar

**15.5.** ¿Cómo se debería conectar un op-amp para hacer un circuito integrador que no invierta su salida, como ocurre con el descrito en este capítulo? Justificar



• Toda función analógica que realice un amplificador operacional, la puede hacer también un procesador numérico, y esto es lo que conviene cuando la operación es compleja, por ejemplo en el Segway, bicicleta paralelo impulsado con baterías, que responde a órdenes de manejo dadas por los movimientos instintivos del cuerpo humano en equilibrio. El aparato, inventado en 2001, aún es muy caro, en comparación con el servicio que brinda.

## • Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras amplificadores operacionales, op-amp, filtros activos, y generador de funciones.
- En estos sitios hay, respectivamente, un excelente capítulo sobre amplificadores operacionales, que forma parte de un curso de Tony R. Kuphaldt. (Está en inglés.), un buen curso en castellano, y datos de un sismógrafo de aficionado:  
[http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric\\_web/Semi/SEMI\\_8.html](http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric_web/Semi/SEMI_8.html)  
[http://www.ifent.org/temas/amplificadores\\_operacionales.asp](http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp)  
<http://pages.prodigy.net/fxc/>
- Jung, Walter G. *Amplificadores operacionales integrados; circuitos prácticos*, Paraninfo, Madrid, 1991. Este libro está en la Biblioteca de la Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, Buenos Aires.
- [http://gwenaelm.free.fr/Physique/Cadrel/index\\_capes\\_mpp.html](http://gwenaelm.free.fr/Physique/Cadrel/index_capes_mpp.html)