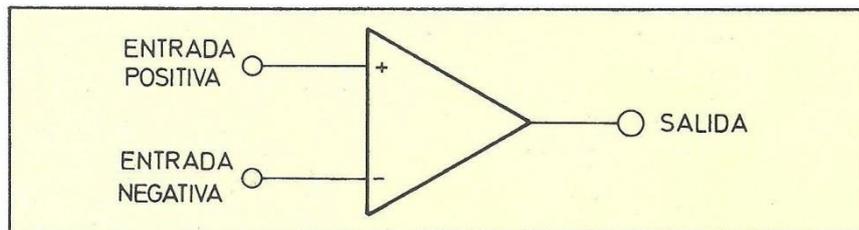
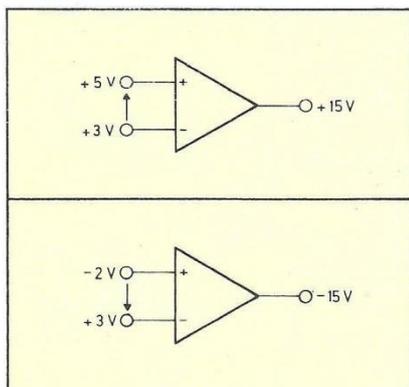


Características básicas

En esquemas de lógica digital es corriente simbolizar determinados circuitos, más o menos complejos, en relación a la *función* que desarrollan, más que por su esquema eléctrico. Tal es el caso de las puertas lógicas (NOR, NAND, etc.), que internamente están constituidas por componentes discretos interconectados de manera especial.

Algo parecido ocurre con determinados circuitos analógicos, en los que tiende a simplificarse un complicado esquema de interconexión.

La polaridad de la tensión de salida depende de la diferencia entre las tensiones en las entradas.



Simbolo de un amplificador operacional.

nes entre transistores, diodos y resistencias, con una simbología sencilla e indicativa de la función que realiza. Tal es el caso de los llamados *amplificadores operacionales*.

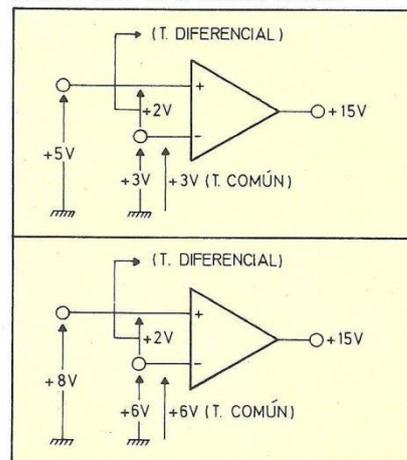
Desde el punto de vista teórico, un amplificador operacional es una especie de «caja mágica» con tan sólo tres terminales. Uno de ellos es la *salida*, cuya tensión o corriente están siempre referidas a una masa que se supone implícita (y que en la realidad está relacionada con la tensión de alimentación del circuito), y los otros dos se corresponden con las entradas.

Existe una *entrada positiva* y una *entrada negativa*. Cuando la tensión aplicada a la primera es superior a la aplicada a la segunda, la salida del amplificador operacional es *positiva*. Si, por el contrario, la tensión sobre la entrada positiva es inferior

a la de la negativa, la salida es *negativa*.

Vemos que lo que cuenta para un operacional es la *diferencia* de tensión.

La tensión de salida es la misma, siempre que la tensión diferencial sea la misma, no importando el valor de la tensión común.

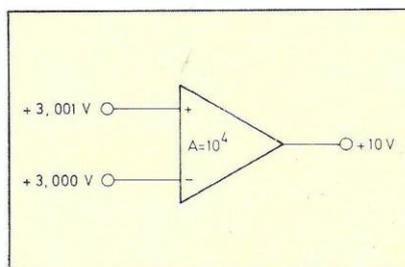


sión entre sus entradas. Así, se habla corrientemente de la *tensión diferencial* aplicada a las mismas. Pero no debemos olvidar que tales tensiones van siempre referidas a esa masa implícita de la que hablamos antes. Existirá, por tanto, un cierto valor de *tensión común* a ambas entradas, que teóricamente debe ser ignorada por el amplificador operacional.

La ganancia

Se denomina *ganancia* de un amplificador operacional a la relación o cociente entre la tensión de salida y la tensión diferencial de entrada aplicada al mismo. El valor de tal ganancia suele representarse como A (de *amplificación*), y su valor real suele ser muy elevado (como mínimo, 10.000; en algunos casos, la ganancia es superior a 10^7). Bajo el punto de vista teórico, se considera que la ganancia de un operacional es infinita.

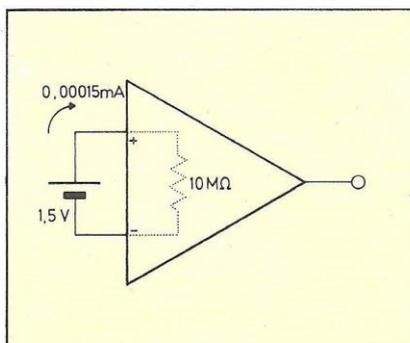
El adoptar la ganancia valores tan altos, significa que con una muy pequeña diferencia de tensión entre sus entradas, se consiguen elevadas tensiones de salida. Por ejemplo, con una ganancia de 10^4 (la más baja que suele encontrarse), se



La ganancia de un operacional es muy elevada.

consigue obtener una salida de 10 V con tan sólo 1 mV (una milésima de voltio) de tensión diferencial de entrada.

La impedancia de entrada de un operacional es muy grande.



En la práctica, la tensión de salida de un operacional no puede tomar *cualquier* valor, viniendo limitada por las tensiones de alimentación del mismo. Así, si, como es corriente, se alimenta a un operacional con ± 15 V, la salida no podrá adquirir valores mayores de ± 15 V, ni menores de -15 V. Cuando la tensión de salida adopta uno de estos dos valores, se dice que el operacional está *saturado*.

Impedancias

Un operacional ideal tiene una impedancia de entrada infinita (lo que significa que sus entradas *no* absorben corriente), y una salida nula (la tensión de salida *no varía* con la corriente de salida). En la práctica no ocurre así, aunque se encuentran valores muy elevados para la primera (entre 10^5 y 10^{10} ohmios), y muy bajos para la última (inferiores casi siempre a 150 ohmios).

Con esta «caja mágica» pueden realizarse infinidad de circuitos, tales como amplificadores, comparadores, osciladores, integradores, detectores de nivel, rectificadores, filtros, etc., que poco a poco iremos viendo.

Circuito inversor

La ganancia de un amplificador operacional es muy elevada (siempre superior a 10^4). Sin embargo, la de un componente concreto no puede ser fijada por el fabricante, sino en unos muy amplios márgenes (por ejemplo, entre 10.000 y 20.000). Aparte de ser un valor de ganancia sumamente elevado para casi cualquier aplicación práctica, su concreción es aún más limitativa, dado que no puede conocerse con exactitud. Es por eso que siempre se utilizan los operacionales en circuitos que proporcionan una cierta realimentación negativa, con lo que la

ganancia se reduce y su valor puede elegirse con mayor precisión.

El circuito más corrientemente utilizado es el mostrado en la figura 1, en el que la resistencia R2 proporciona el grado de realimentación negativa necesario. Puede demostrarse matemáticamente que la ganancia de tal circuito ($G_v = v_s/v_e$) tiene por valor:

$$G_v = \frac{R_2}{R_1}$$

estando la señal de salida en oposición de fase respecto de la entrada. La impedancia de entrada al circuito es aproximadamente igual al valor de R1.

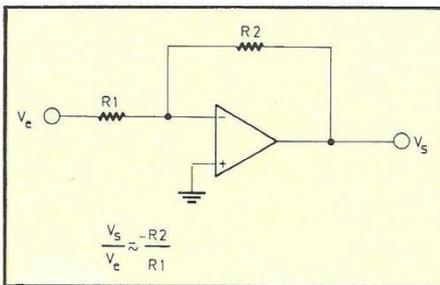
Circuito no inversor

Cuando un operacional va a utilizarse como amplificador de baja frecuencia no suele ser importante que exista desfase entre la señal de salida y la de entrada. No obstante, pueden existir aplicaciones en las que sea preciso conservar igual fase, aunque con amplitud de salida distinta.

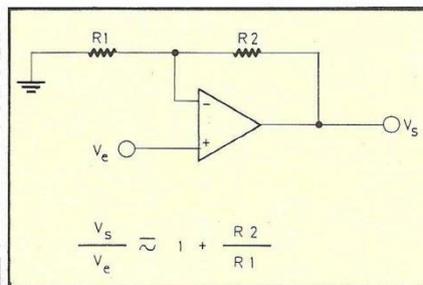
En tal caso, el circuito a utilizar es el mostrado en la figura 2, en el cual la ganancia está también fijada por los valores de las resistencias R1 y R2 en la forma:

$$G_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

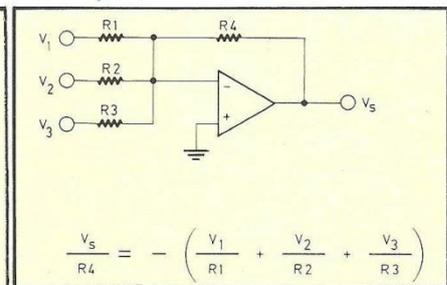
1. Circuito inversor.



2. Circuito no inversor.



3. Circuito sumador-inversor.



siendo la impedancia de entrada de un valor muy elevado.

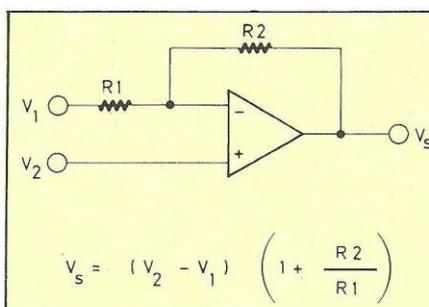
Tanto en este circuito como en el anterior, los valores de ganancia y resistencia de entrada son tanto más ciertos cuanto mayor sea la ganancia del operacional y menores sean las corrientes de entrada al mismo.

Mezcladores

El circuito mostrado en la figura 3 no sólo amplifica las señales presentes en los terminales de entrada, sino que también realiza la mezcla de las mismas. Además, y dado que la entrada negativa del operacional actúa como una masa virtual, no existe interacción entre unas señales de entrada y otras.

La ganancia de cada una de las entradas puede hacerse variar independientemente de las otras, con tan sólo elegir la relación adecuada entre la resistencia de entrada respectiva y la de realimentación (R4). En este montaje existe inversión de fase entre entrada y salida.

Puede realizarse una mezcla combinada con y sin inversiones de fase si se utiliza el circuito de la figura 4. Las entradas relacionadas con la negativa del operacional tendrá in-

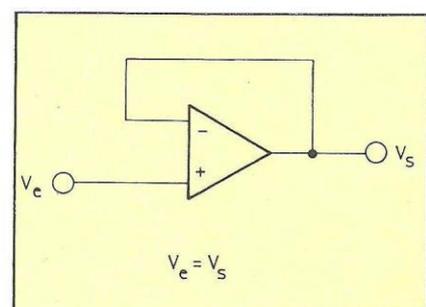


4. Circuito restador.

versión de fase. Debido a tal combinación, la señal de salida es realmente la *diferencia* entre la mezcla de las entradas *sin* inversión de fase y la mezcla de las que tienen tal inversión.

Separadores

En algunas ocasiones interesa poder disponer de un circuito que actúe como separador entre etapas de un equipo; es decir, que permita el paso de señal en un sentido y lo impida en el otro. Aunque los circuitos anteriormente presentados cumplen de forma muy aceptable tal condi-



5. Circuito separador.

ción, el mostrado en la figura 5 presenta mayores ventajas.

En primer lugar, la acción separadora es muchísimo más eficaz, no permitiendo que la señal de salida retroceda de nuevo hacia la entrada. Además, la impedancia de entrada que presenta es sumamente elevada, pues teóricamente es igual a la de entrada del operacional (no menor de 100 kΩ) multiplicada por la ganancia global del mismo (no inferior a 10^4), lo que la eleva a muchos megohmios (no menor de 1.000 MΩ). En cambio, el circuito no aporta ganancia alguna a la señal, siendo la amplitud de salida igual a la de entrada.

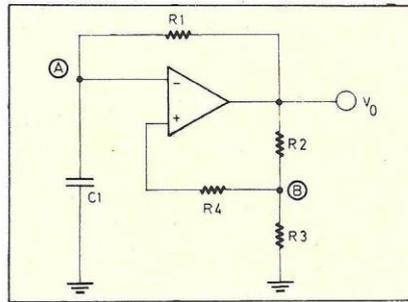
Principios

Una oscilación mantenida suele producirse cuando una parte de la señal de salida de un circuito es realimentada de nuevo hacia la entrada del mismo con la polaridad o fase adecuadas. Esto mismo es lo que se hace en circuitos que incorporan amplificadores operacionales. Según la red de realimentación empleada, pueden conseguirse formas de onda senoidales, rectangulares, triangulares, etc.

Señal rectangular

El oscilador más sencillo que puede montarse es el que genera una señal rectangular, esto es, que varía periódicamente entre dos niveles fijos de tensión. Tal tipo de señal puede utilizarse para prueba de equipos de baja frecuencia, para encender luces intermitentes, como señal de reloj («clock») en un sistema digital, etc.

En la figura 1 se muestra el esquema básico. En el momento inicial, el condensador C1 está descargado y la tensión en el punto A será nula ($V_A = 0$). La salida V_o estará, por ejemplo, a una tensión igual a la de alimentación positiva del operacional ($+V_{cc}$). Una parte de dicha ten-



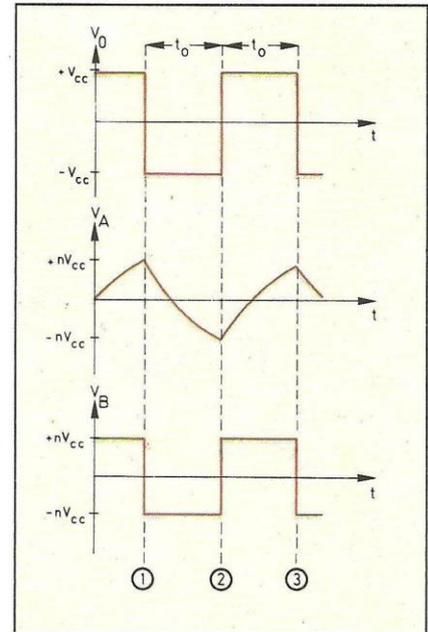
1. Circuito básico de un generador de onda cuadrada con un operacional.

sión es aplicada a la entrada positiva del operacional a través del divisor formado por R2-R3 y la resistencia R4, lo que la mantiene a una tensión positiva.

La tensión de salida (V_o) también es llevada al condensador C1 a través de R1, con lo que comenzará a cargarse. En consecuencia, la tensión sobre la entrada negativa del operacional (V_A) comenzará a aumentar exponencialmente (ver figura 2). En el momento que que dicha tensión supere muy ligeramente la que existe en la entrada positiva, la salida del operacional adquirirá un valor igual al de la tensión de alimentación negativa (instante marcado como 1 en la figura 2).

La tensión en la entrada positiva (igual a V_B tomará un valor negativo, y el condensador C1 tenderá ahora a cargarse a través de R1 a la tensión fijada por la salida del operacional (V_o), ahora de valor negativo.

2. Formas de onda obtenidas en distintos puntos.



Por tanto, la tensión sobre la entrada negativa (V_A) irá disminuyendo exponencialmente de valor, pasará por cero, tomará valores negativos, y en el instante en que adquiera un valor ligeramente más negativo que el mantenido sobre la entrada positiva, la salida del operacional tomará de nuevo el valor de la tensión de alimentación positiva (instante 2 de la figura 2).

El ciclo se repetirá indefinidamente, viniendo dado el tiempo que la salida permanece a una tensión igual a la de alimentación (tanto la positiva como la negativa) por la expresión:

$$t_o = R1 \cdot C1 \cdot \ln \frac{1+n}{1-n}$$

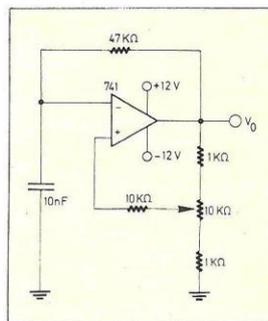
en donde: $n = R3/(R2 + R3)$. Si los valores de R2 y R3 se hacen iguales, el valor de t_o es, aproximadamente, igual al producto ($R1 \cdot C1$). Si se hace que $R2 = 10 \cdot R3$, el valor de t_o es:

$$t_o = 0,18 \cdot R1 \cdot C1$$

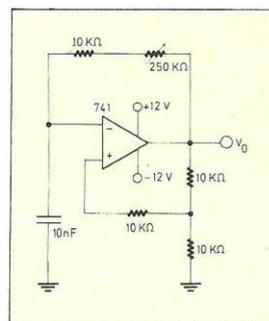
Mientras que si se hace $R3 = 10 \cdot R2$, entonces t_o vale

$$t_o = 3 \cdot R1 \cdot C1.$$

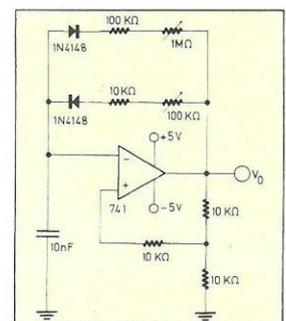
Aprovechando esta circunstancia, se construyen circuitos cuya frecuencia de repetición de impulsos pueda variarse en unos márgenes muy amplios. Por ejemplo, con el



3. Generador de onda cuadrada de frecuencia ajustable entre 180 y 3.400 Hz.



4. Generador de onda cuadrada de frecuencia ajustable entre 180 y 4.500 Hz.



5. Generador de impulsos positivos de duración y separación ajustables.

esquema de la figura 3 se consigue una onda cuadrada de unos 20 V de amplitud (pico a pico) y una frecuencia que puede variarse (con ayuda de potenciómetro) entre 180 y 3.400 Hz, aproximadamente.

Otros circuitos

También se puede conseguir variar la frecuencia de oscilación variando la resistencia a través de la cual se carga el condensador. Así, en el circuito de la figura 4 puede conseguirse el mismo tipo de señal cuadrada que antes (20 V pico-pico), pudiéndose variar su frecuencia entre 180 y 4.500 Hz, aproximadamente.

Si la resistencia R1 (figura 1) es distinta para la carga en un sentido y en otro del condensador, se conseguirá una señal rectangular, en lugar de cuadrada. Esto puede lograrse fácilmente introduciendo unos diodos.

Así, con el circuito de la figura 5 se consigue una secuencia de impulsos positivos. La anchura de los mismos puede variarse entre 0,1 y 1,2 mseg con la resistencia ajustable de 100 kΩ. La separación entre impulsos puede elegirse entre 1 y 12 mseg con ayuda de la resistencia ajustable de 1 MΩ. La señal de salida tiene una amplitud de 10 V pico a pico.

Señales senoidales

Existen ciertas redes de elementos pasivos (resistencias, condensadores, bobinas) que, conectadas entre la salida y las entradas de un amplificador operacional, producen una realimentación tal que el operacional genera una señal senoidal. Una de las redes más populares es el llamado *punte de Wien*.

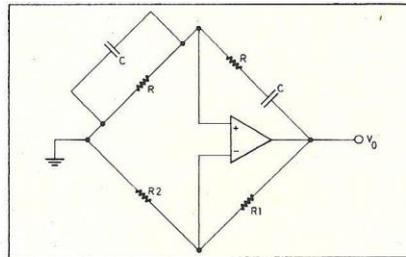
En un circuito de este tipo (ver figura 1) se conectan las entradas del amplificador operacional entre dos extremos del puente, siendo los otros dos vértices la masa y la salida de señal.

Se demuestra matemáticamente que la frecuencia de oscilación es:

$$f_o = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

y que además debe cumplirse que: $R_1 = 2 \cdot R_2$. Para esta última condición, suele sustituirse una de las resistencias, R_1 ó R_2 , por una red cuya resistencia efectiva está gobernada por la amplitud de la señal de salida. Así, el circuito se controla a sí mismo para cumplir con las condiciones arriba expuestas.

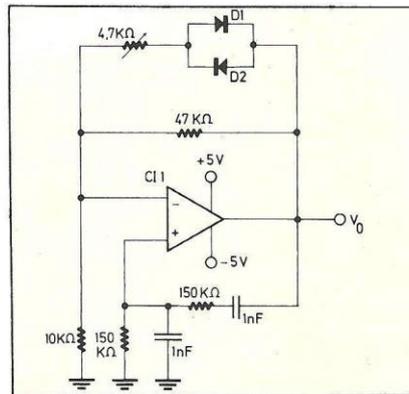
La figura 2 da un esquema con valores prácticos, en el que la frecuencia de salida es de 1 kHz, aproximada-



1. Circuito oscilador en puente de Wien con un operacional.

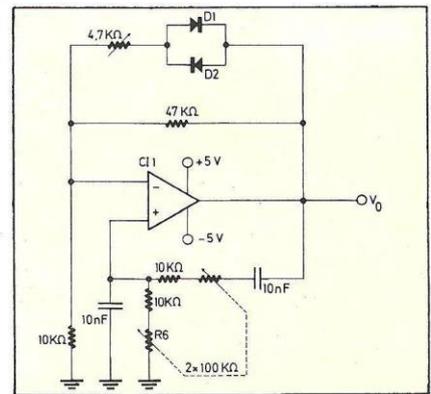
mente. Haciendo variables simultáneamente los valores de las resistencias asociadas a los condensa-

2. Oscilador senoidal de 1 kHz. $D1 = D2 = 1N4148$. $C11 = 741$.



dores, puede construirse un generador de señal. En la figura 3 se muestra un oscilador capaz de generar señales dentro del margen de 150 a 1.600 Hz, aproximadamente. Si se toma como base el último circuito comentado, y se introducen unos conmutadores que conecten condensadores de distintos valores, puede cubrirse fácilmente el margen de señales de baja frecuencia, lo que resultará muy útil para aquellos que no dispongan de generador de señal. El esquema de la figura 4 entrega señales en el margen de 1,5 Hz a 160 kHz.

3. Oscilador senoidal de 150 a 1.600 Hz. $D1 = D2 = 1N4148$. $C11 = 741$.



Generadores de cuadratura

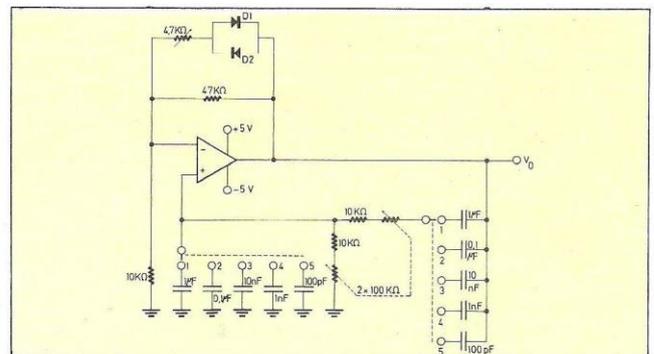
Otra forma de producir una señal senoidal es con el empleo de dos amplificadores operacionales montados como integradores. En dicho montaje, la resistencia de realimentación se sustituye por un condensador, de manera que la tensión de salida resulta ser igual a la integración matemática de la tensión de entrada.

Tal generador de señal tiene una ventaja adicional, y es la de que de las salidas de ambos operacionales se obtienen señales en cuadratura de fase (desfasadas 90°), de forma que si una de ellas sigue la función seno, la otra salida varía según la función coseno. En la figura 5 se da un esquema de estas características, y cuya frecuencia de oscilación es de 400 Hz.

Otras funciones

Si se acoplan dos operacionales, uno como comparador y otro como integrador, a la salida de este último se obtendrá una señal de forma triangular, mientras que la salida del primero dará una onda cuadrada. Con el circuito mostrado en la fi-

4. Oscilador senoidal de varias gamas. 1) 1,5 - 16 Hz. 2) 15 - 160 Hz. 3) 150 - 1.600 Hz. 4) 1,5 - 16 kHz. 5) 15 - 160 kHz. $D1 = D2 = 1N4148$. $C11 = 741$.



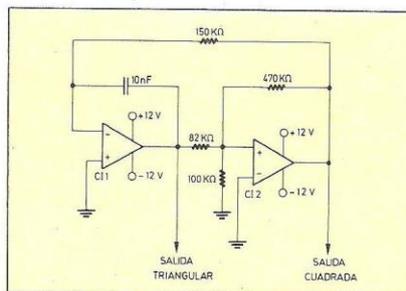
gura 6 se obtiene una señal cuadrada de unos 20 V pico a pico, y otra triangular de unos 3,5 V pico a pico, ambas con una frecuencia de repetición de unos 950 Hz. Si se desea, la frecuencia puede ajustarse al valor que sea necesario con tan solo

sustituir la resistencia de 150 kΩ por otra de valor:

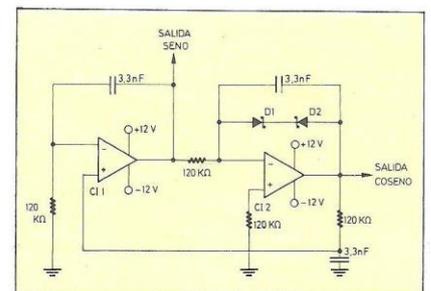
$$R = 0,16 \cdot f_o$$

siendo f_o la frecuencia buscada (en Hz) y viniendo medida R en kΩ.

5. Oscilador en cuadratura. $D1 = D2 = BZX83/C6V8$. $C11 - C12 = 747$.



6. Oscilador de señales triangular y cuadrada. $C11 - C12 = 747$.

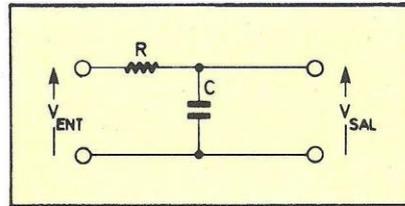


Condensadores

Un condensador es un componente cuya reactancia (magnitud eléctrica equivalente a la resistencia, y que denota la mayor o menor oposición al paso de una corriente) es inversamente proporcional a la frecuencia de la corriente alterna que lo atraviesa, de forma que cuanto mayor es dicha frecuencia, menor oposición presenta el condensador al paso de la corriente.

Diferenciadores

Una red formada por un condensador y una resistencia dispuestos como se indica en la figura 1 recibe el nombre de *diferenciadora*, debido a que se puede demostrar matemáticamente que la tensión de salida es la derivada de la entrada. Dado que el condensador presenta una menor impedancia de paso frente a señales de entrada de frecuencia cada vez más elevadas, la red diferenciadora se comporta como un filtro paso-alto, o circuito que permite el paso a su través de señales de frecuencia altas, y lo impide a las de frecuencias bajas. El circuito diferenciador es una red pasiva, pues la tensión en su salida no



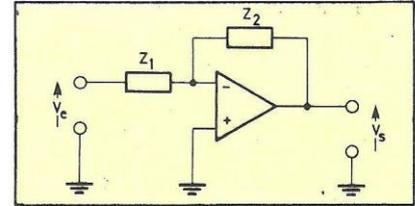
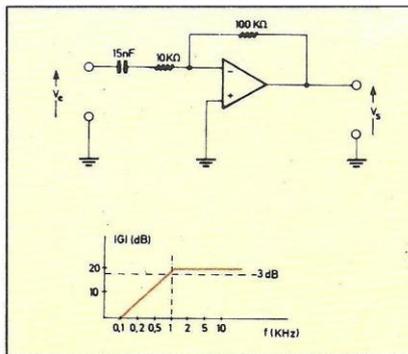
1. Red diferenciadora.

puede ser nunca mayor que en su entrada.

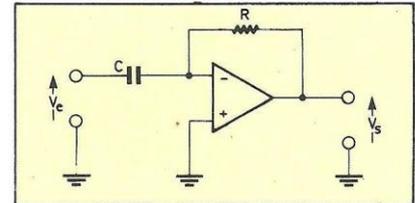
La ganancia del circuito de la figura 2 puede expresarse como:

$$G = \frac{Z_2}{Z_1}$$

4. Filtro paso-alto práctico.



2. Configuración básica amplificadora-inversora.



3. Diferenciador con operacional.

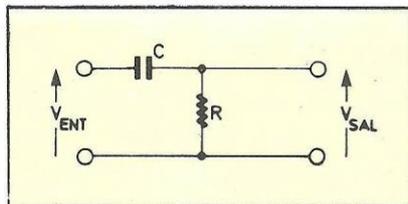
Si se hace que el elemento denominado Z_1 sea un condensador y el Z_2 una resistencia (figura 3), la ganancia del conjunto dependerá de la frecuencia de la señal manejada. Puesto que el valor de Z_1 (impedancia del condensador) disminuye conforme aumenta la frecuencia, el valor de la ganancia aumentará con la frecuencia, comportándose el conjunto como una red diferenciadora.

La diferencia fundamental con una red pasiva de igual naturaleza, es

que el circuito de la figura 3 proporciona ganancia (tensión de salida mayor que la de entrada) para aquellas señales cuya frecuencia sea superior a la definida por:

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

La ganancia de tal circuito crece linealmente con la frecuencia. Si se desea limitar el valor de tal ganancia, puede emplearse un montaje como el mostrado en la figura 4. Con los valores dados, el conjunto se comporta como un filtro paso-alto de ganancia 20 dB y frecuencia de corte (-3 dB) de 1 kHz.

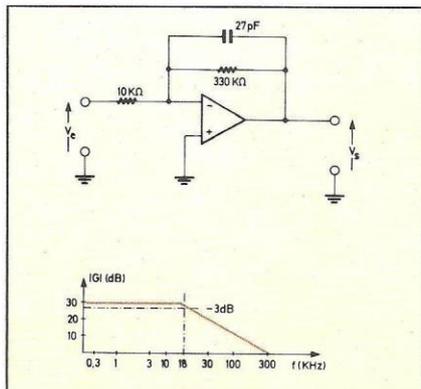


5. Red integradora.

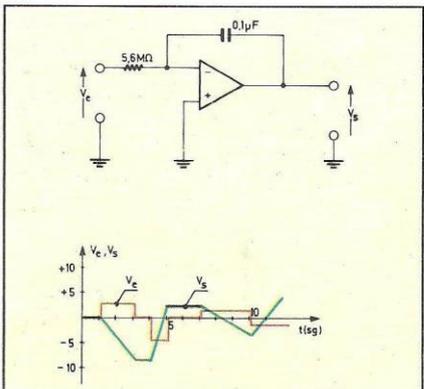
dora. También aquí puede limitarse la ganancia a frecuencias bajas disponiendo una segunda resistencia como se indica en la figura 6, circuito con el que se consigue un filtro paso-bajo de ganancia 30 dB y frecuencia de corte en 18 kHz.

Cuando a un circuito integrador con operacional se le aplica una tensión continua a la entrada, la tensión de salida crece lineal y proporcionalmente al valor de tal tensión continua y al tiempo transcurrido. Así, con el circuito mostrado en la figura 7, la tensión de salida disminuye a razón de 1,8 V por segundo por cada voltio de tensión continua positiva aplicada a la entrada. La tensión de salida se *mantiene constante* cuando la tensión de entrada se anula, y crece a igual velocidad y proporción que antes, cuando la tensión de entrada se hace continua y negativa.

6. Filtro paso-bajo práctico.



7. Integrador de continua.



Integradores

Una red como la de la figura 5 se denomina *integradora*, por ser la tensión de salida la integración matemática de la de entrada. Tal red se comporta como un filtro paso-bajo puesto que atenúa las señales que pasan a su través en proporción directa a su frecuencia. Si en el circuito de la figura 2 se sustituye Z_1 por una resistencia y Z_2 por un condensador, el conjunto se comportará como una red integra-