

Preliminares

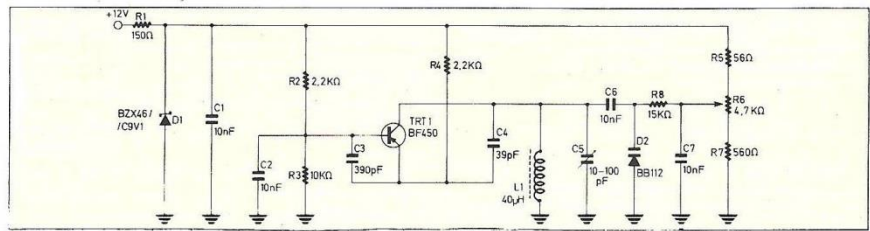
Las siglas VCO provienen de las iniciales de las palabras «Voltage Controlled Oscillator», que significan oscilador controlado por tensión; es decir, se trata de componentes, circuitos o equipos cuya frecuencia de oscilación viene determinada por una tensión de control aplicada sobre ellos.

Tal posibilidad resulta muy útil en la práctica, puesto que permite efectuar el control de frecuencia sin necesidad de emplear componentes delicados desde el punto de vista mecánico, como pueden ser condensadores variables o bobinas de núcleo ajustable.

Diodos varicap

Uno de los componentes ampliamente utilizado en circuitos VCO es un diodo especialmente constituido, que presenta entre sus terminales un valor de capacidad que depende de la tensión inversa aplicada entre ellos. Cuanto mayor sea la tensión, menor es la capacidad.

Tales diodos suelen denominarse de *capacidad variable*, o abreviadamente, *varicap* (de «variable capacity»). El valor de la capacidad es muy pequeño. Por ejemplo, el tipo



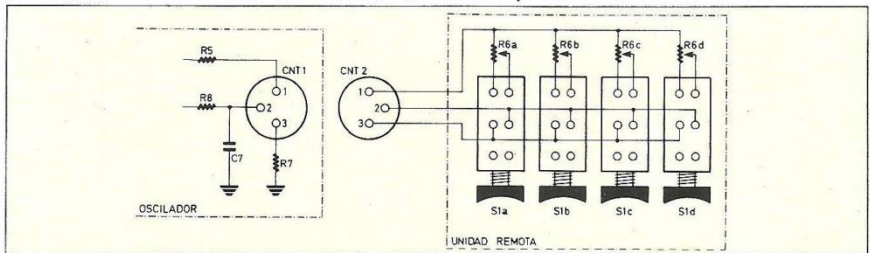
1. Oscilador controlado por tensión (1.030-2.090 kHz).

BB119 presenta una capacidad que varía entre 15 y 22 pF, cuando la tensión inversa aplicada sobre él se hace variar entre 10 y 4 V.

Estos diodos se emplean mucho en cabezas sintonizadoras de radio y televisión, así como en circuitos de control automático de frecuencia, osciladores, botoneras de preselección de emisoras y equipos similares.

En la figura 1 se muestra un circuito que es capaz de generar una oscilación cuya frecuencia puede variarse entre 1030 y 2090 kHz con ayuda del potenciómetro R6. Dicho potenciómetro aplica una tensión variable sobre el diodo varicap D2, contenido en un circuito oscilador Colpitts clásico. Tal circuito puede emplearse como oscilador local en un receptor superheterodino para la banda de

2. Control remoto por tensión continua del oscilador de la figura 1. R6a-R6d son resistencias ajustables de 4,7 kΩ cada una. S1a-S1d son conmutadores de botonera interaccionados. CNT1 es un conector DIN hembra de tres terminales, mientras que CNT2 es un DIN macho.



radiodifusión en onda media (540-1600 kHz).

Control remoto

El gobierno de la frecuencia de oscilación por medio de una tensión continua proporciona la posibilidad de efectuar un control remoto a través de un simple cable trenzado multihilo de la longitud que sea necesaria y sin apantallamientos.

Así, por ejemplo, sustituyendo el potenciómetro de ajuste R6 de la figura 1 por un conjunto de conmutadores y resistencias ajustables, tal como se muestra en la figura 2, puede elegirse la frecuencia de oscilación con tan sólo pulsar el conmutador adecuado. El cable de unión es trifilar y no requiere blindaje alguno.

El mismo procedimiento de conmutación para la tensión del varicap puede emplearse para botoneras de selección automática de emisoras (bloqueo de presintonía) en equipos receptores. En este caso, debe tenerse en cuenta que también hay que llevar la tensión de sintonía (curso de R6) a la sección de antena del sintonizador, que igualmente estará equipada con diodos varicap.

Operacionales

También los generadores de onda cuadrada que emplean operacionales pueden gobernarse con una tensión continua para variar su frecuencia de repetición de impulsos de salida.

Así, en el circuito de la figura 3, la frecuencia de salida puede hacerse variar entre 5,1 y 10,1 kHz con ayuda

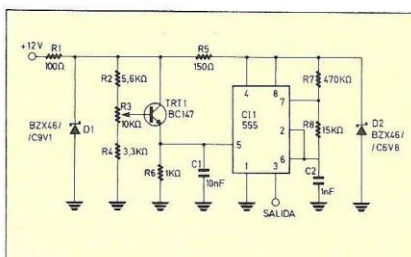
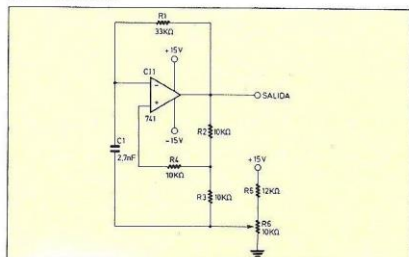
4. Generador de impulsos negativos (nivel de referencia 6,8 V) de cadencia variable.

del potenciómetro R6, que proporciona en el punto A una tensión comprendida entre 0 y 7 V.

Debe hacerse notar que la tensión en el punto A no tiene porqué provenir necesariamente de un potenciómetro, como ocurre en la figura 3, sino que a tal punto puede hacerse llegar la tensión de mando de cualquier otra fuente, ya sea manual o automáticamente; y bien en forma analógica (variación continua) o digital (variación por saltos).

Un control similar puede hacerse con algunos circuitos especiales, como con el temporizador integrado del tipo 555 ó 556. En la figura 4 se da un circuito capaz de generar impulsos negativos de 10 µseg de duración y 6 V de amplitud. La frecuencia de repetición de tales impulsos puede hacerse variar entre 1,5 y 19 kHz con ayuda de R3.

Obsérvese que en el circuito de la figura 4 se emplea TR1 como seguidor de tensión del cursor del potenciómetro R3. Si se conectara dicho cursor al circuito integrado directamente, habría que tener en cuenta las resistencias internas que incorpora dicho circuito, que podrían hacer variar el margen de control de la frecuencia de repetición de impulsos de salida.

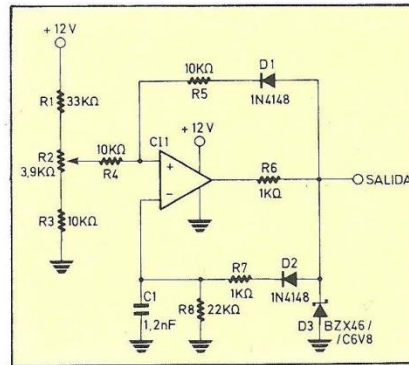


Otros circuitos

En equipos en los que es necesario generar señales de una cierta frecuencia con gran precisión, tales como sintetizadores o receptores de modulación en frecuencia estereofónica, suelen emplearse circuitos similares al mostrado en la figura 1. El condensador C1 se carga a través de R7 y D2 cuando la salida del operacional es alta. Cuando la tensión sobre dicho condensador (conectado a la entrada negativa de C11) iguala a la de la entrada positiva de C11, la salida del operacional va a nivel bajo.

En esa situación, D1 y D2 quedan polarizados en inversa, la tensión de la entrada positiva de C11 queda fijada por el potenciómetro R2 y el condensador C1 tiende a descargarse lentamente a través de R8. Cuando la tensión sobre el condensador ha caído hasta el valor presente en la entrada positiva del operacional, éste bascula de nuevo su salida a nivel alto, y gracias a la histéresis proporcionada por D1 y R5, el proceso descrito comienza de nuevo.

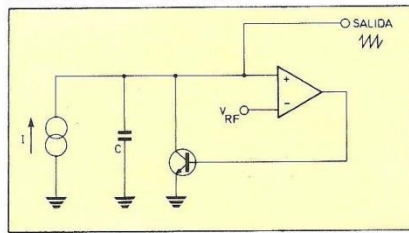
En la salida se encuentran impulsos positivos de 6,8 V de amplitud (fijada por D3) y 0,9 µseg de duración (fi-



1. Oscilador de frecuencia variable (60-90 kHz). C11 puede ser uno de los circuitos contenidos en los operacionales LM324 o TDB0158.

jada por el tiempo de carga de C1), cuya cadencia de repetición viene fijada por el tiempo de descarga de C1. A su vez, tal tiempo depende de la tensión proporcionada por R2.

2. Principio de funcionamiento de un generador en diente de sierra.



Al comenzar la carga, la tensión sobre el condensador es nula, pero va creciendo linealmente por la acción del generador de corriente. Cuando la tensión sobre el condensador alcanza V_{REF} , el comparador cambia su salida de nivel, con lo que hace conductor al transistor, y éste descarga por completo el condensador a su través, con lo que el proceso vuelve a comenzar. La salida es un diente de sierra.

Variando el valor de V_{REF} , variará el tiempo que el diente de sierra tarda en disparar el comparador, y, por tanto, variará la frecuencia de salida. En la figura 3, se muestra un circuito práctico basado en este mismo principio. Las puertas C13 y C14 actúan como un monoestable para asegu-

rar la completa descarga de C1. Con el potenciómetro R4 se consigue variar la frecuencia de salida entre 1 y 6 kHz. El generador de corriente está formado por TRT1, D1, R1 y R2. C12 está montado como separador, para que la carga conectada a la salida no influya sobre el funcionamiento del circuito.

Base de tiempos

El principal inconveniente del circuito anterior es que la amplitud de los impulsos de salida varía en relación inversa a su frecuencia. Tal inconveniente se puede obviar con el circuito de la figura 4.

En él se ha sustituido el generador

por lo que variando el cursor de dicho potenciómetro se controla la frecuencia de salida del circuito. Con los valores dados, la frecuencia de repetición de impulsos puede variarse entre 60 y 90 kHz, por lo que tal circuito puede emplearse como generador de 76 kHz para un decodificador estereo de modulación en frecuencia. El divisor de tensión R1-R2-R3 puede sustituirse por un circuito que controle automáticamente el valor de la frecuencia generada.

Generadores de corriente

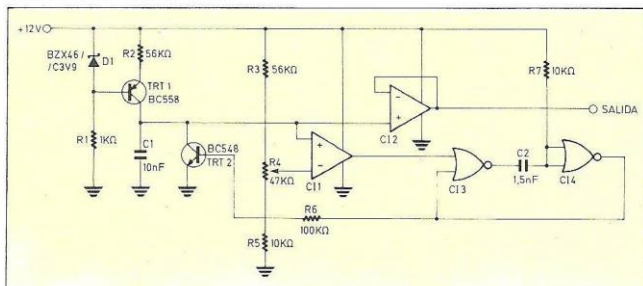
El inconveniente principal que tiene el hecho de cargar un condensador a partir de una tensión constante, es que la carga adquirida por aquél (y, por tanto, su tensión) crece de forma exponencial.

En cambio, cuando un condensador se carga con un generador de corriente constante, la tensión sobre él crece linealmente, lo que en muchas ocasiones es una gran ventaja.

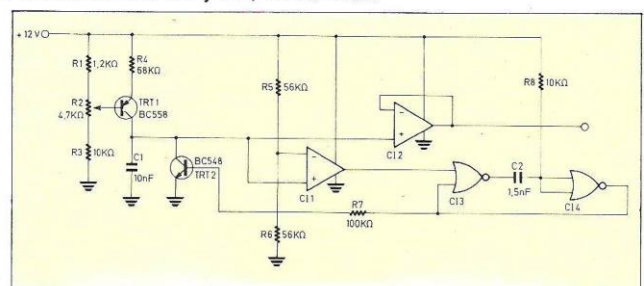
En el circuito esquemático de la figura 2, el condensador C se carga con un generador de corriente. La tensión sobre sus bornas es llevada a un circuito que la compara con un valor de referencia V_{REF} .

de corriente constante por otro cuya corriente puede ajustarse variando la tensión aplicada a la base de TRT1. Así, según sea el valor de tal corriente, la tensión sobre el condensador alcanza el umbral de cambio del comparador C11 en más o menos tiempo, con lo que variará la frecuencia del diente de sierra generado, que ahora es de amplitud constante. Con los valores dados, tal amplitud es de 6 V y la frecuencia puede variarse entre 100 Hz y 1 kHz. Con circuitos similares a éste se construyen las bases de tiempos de los osciloscopios. El monoestable (C13-C14) se sustituye por un biestable, que es cambiado de estado por la señal de disparo («trigger»), ya sea interna o externamente.

3. Generador de diente de sierra de frecuencia variable. C11 y C12 son circuitos contenidos en los operacionales LM324 o TDB0158. C13 y C14 son puertas CMOS 4001.



4. Generador de diente de sierra de amplitud constante y frecuencia variable. Para C11 y C12 pueden emplearse operacionales del tipo LM324 o TDB0158. Para C13 y C14, CMOS 4001.



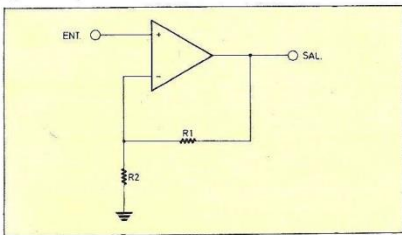
Conceptos básicos

Las siglas VCA corresponden a las iniciales de los términos «Voltage Controlled Amplifier», que significa amplificador controlado por tensión. De forma similar a lo que es un VCO, un VCA es un componente, circuito o equipo, cuya ganancia depende de una tensión de control. Existen diversas formas de construir prácticamente un VCA. Casi todas emplean amplificadores operacionales como elemento circuital básico, al que se le adicionan determinados componentes en ciertas configuraciones. La ganancia de un circuito clásico como el de la figura 1 viene dado por la expresión:

$$G = 1 + \frac{R1}{R2}$$

Si una de las dos resistencias se sus-

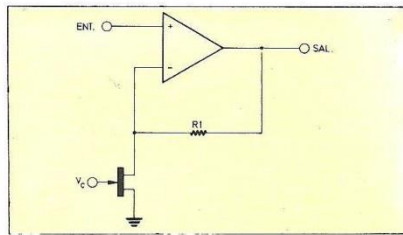
1. Configuración básica con amplificador operacional.



tituye por un elemento cuya resistencia pueda hacerse variar con ayuda de una tensión, el conjunto será un VCA. Un componente que se presta para realizar tal función es un FET, que se dispone en lugar de R2, tal como muestra la figura 2.

Un FET presenta entre sus terminales drenador y surtidor, una resistencia que depende de la tensión aplicada al electrodo puerta. Existe un cierto margen de valores de tensión para el cual tal relación es lineal. En la figura 3 se muestra un circuito práctico basado en este principio. La ganancia del circuito puede ser variada entre 1 y 100, ajustando el potenciómetro R3. El conjunto R4-R5-C1 proporciona una cierta realimentación que mejora la distorsión. La tensión de pico de salida no debe superar ± 12 V, lo que significa que la tensión máxima de entrada debe limitarse a 85 mV eficaces.

2. VCA con FET en el lazo de realimentación.



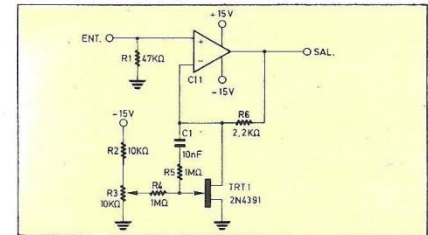
La banda de paso del conjunto depende del modelo del operacional empleado. Con los tipos corrientes (741, 747, 324) está limitada a unos 10 kHz. Empleando modelos rápidos (318, 351, 356, 357) pueden conseguirse anchos de banda de señal de 25 kHz y superiores. La impedancia de entrada es igual al valor de R1.

Control digital

En algunas aplicaciones no importa que el valor exacto de ganancia pueda controlarse linealmente entre dos valores extremos, sino que adopte tan sólo determinados valores concretos. Es el caso de un amplificador que pueda estar gobernado digitalmente por un ordenador.

En estos casos, lo que suele hacerse es emplear redes de resistencias fi-

3. Circuito VCA práctico.



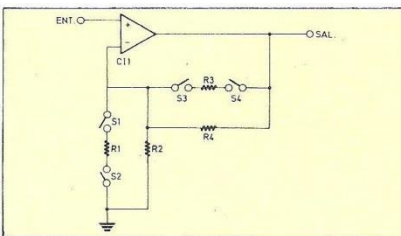
jas que se conmutan con ayuda de la tensión (digital) de control. Un ejemplo se da en la figura 4, en la que los conmutadores S1 a S4 conectan unas u otras resistencias en el circuito de realimentación del operacional, variando así su ganancia.

En la figura 5 se da un ejemplo práctico. Los conmutadores son de estado sólido (CMOS) y van contenidos en CI2. Las señales de control se aplican a los terminales A y B, viniendo dada la ganancia del conjunto por la tabla de la verdad mostrada en la misma figura.

Circuitos especiales

Existe un tipo de operacional especialmente concebido para poder controlar su ganancia a través de un terminal suplementario. Dicho operacional se conoce con las siglas OTA, que provienen de «Operational Transconductance Amplifier».

La etapa de salida de un OTA genera una corriente, en lugar de una tensión, como es lo habitual en un operacional. La corriente de salida es entonces proporcional a la tensión diferencial entre sus entradas. La constante de proporcionalidad entre ambas se denomina *transconduc-*

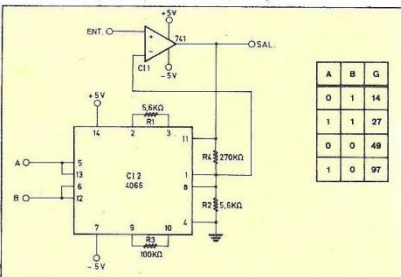


4. Configuración básica de un VCA con ganancias fijas seleccionables.

tancia, y suele venir representada por g_m .

El valor concreto de g_m con que en cada instante opera el OTA es proporcional a la corriente con que se polariza por el terminal suplementario. Dicha corriente suele representarse por I_{ABC} (de «Amplifier Bias Current»). Así, por ejemplo, en el OTA

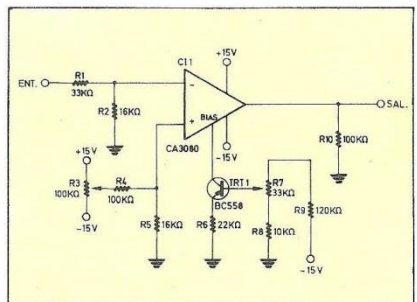
5. VCA controlado digitalmente. El nivel lógico «1» de las señales A y B está en +5V, mientras que el «0» está en -5V.



modelo CA3080, el valor de g_m está comprendido entre 6,7 y 13 mA/V para una corriente de polarización de 500 μ A. Valores proporcionales de g_m se obtienen para valores distintos de I_{ABC} .

Para convertir la corriente de salida del OTA en una tensión, se conecta entre la salida y masa una resistencia, cuyo valor vendrá dado por la ganancia global y la corriente de polarización. En la figura 6 se da un ejemplo práctico en el cual la ganancia puede ajustarse entre 20 y 40 dB con ayuda de R7. El potenciómetro R3 se retocará para que la tensión de salida sea nula cuando lo sea la de entrada. La amplitud máxima de señal en la entrada debe limitarse a 20 mV eficaces.

6. VCA con OTA.



Pendientes

Las siglas VCF corresponden a las iniciales de los términos «Voltage Controlled Filter» o filtro controlado por tensión. En la práctica se trata de filtros (paso-alto, paso-banda o elimina-banda) cuya frecuencia principal o de corte puede determinarse por medio de una tensión de control.

La frecuencia de corte de un filtro paso-alto o paso-bajo es aquella a la cual la atenuación de señales a su través es de 3 dB respecto de una frecuencia de referencia muy alta o muy baja, respectivamente.

La pendiente de un filtro es la relación entre las atenuaciones que sufren dos señales de frecuencias diferentes, situadas ambas más allá del punto de 3 dB. Es corriente expresar la pendiente en dB/oct (decibelios por octava) o en dB/dec (decibelios por década), correspondientes a atenuaciones de señales cuyas frecuencias son una doble de la otra (octava), o bien una diez veces la otra (década).

En filtros, tanto activos como pasivos, que empleen un solo elemento reactivo (bobina o condensador), la pendiente máxima obtenible es de 6 dB/oct ó 20 dB/dec (ambas canti-

puerta puede hacerse variar entre 0 y -4,5 V con ayuda de una resistencia ajustable de 10 kΩ. Según sea tal tensión, así será la resistencia equivalente del FET y, por tanto, la frecuencia de corte del filtro.

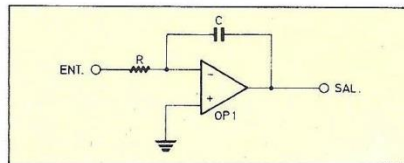
Filtros con OTA

Modernamente se recurre al empleo de otras configuraciones, aprovechando la existencia de los OTA. La salida de tales elementos es un generador de corriente, cuyo valor depende de la diferencia de tensión en las entradas y de la corriente de polarización (I_{ABC}).

Dado que la configuración básica de un filtro paso-bajo (fig. 1) se corresponde exactamente con la de un integrador, se trata de disponer un OTA también como integrador.

En el circuito con un OTA (fig. 4) la máxima velocidad de carga y descarga del condensador C puede hacerse variar con la corriente de polarización. Dicha «velocidad máxima» determina la frecuencia de corte del conjunto, por lo que puede construirse un VCF haciendo variar la corriente de polarización del OTA.

Así, en el circuito de la figura 5 se muestra un filtro paso-bajo práctico. La corriente de polarización (y, por tanto, la frecuencia de corte del fil-



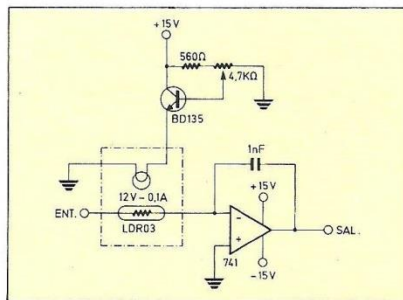
1. Filtro paso-bajo con operacional.

dades son equivalentes). Con la adición de nuevos elementos reactivos, o bien situando un filtro detrás de otro (en cascada), se multiplica la pendiente global, lográndose así filtros de 12, 18 ó 24 dB/oct.

Filtros con operacionales

La figura 1 muestra un circuito clásico de un filtro paso-bajo con operacional (integrador). La frecuencia

2. Filtro paso-bajo de frecuencia variable con LDR.

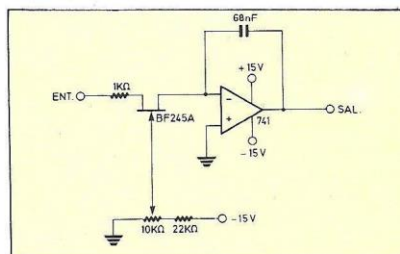


de corte depende directamente de los valores de R y C. Sustituyendo R por un elemento cuya resistencia pueda hacerse variar por medio de una tensión, habremos conseguido un VCF.

En ocasiones se ha empleado una lamparita piloto (incandescente o tipo LED) en conjunción con una fotorresistencia (LDR); según la tensión que se haga llegar al piloto, éste iluminará con mayor o menor intensidad la fotorresistencia, haciéndola adoptar distintos valores que cambiarán la frecuencia del filtro.

La solución no es muy satisfactoria, pues requiere de un aislamiento óptico perfecto del exterior, adolece de falta de linealidad y además su precisión y fiabilidad varían con el tiempo, conforme «envejece» el filamento incandescente del piloto. A pesar de ello, su simplicidad es evidente. La figura 2 muestra un circuito práctico que emplea este principio. La frecuencia de corte puede hacerse variar entre 20 Hz y 20 kHz con ayuda de la resistencia ajustable de 4,7 kΩ.

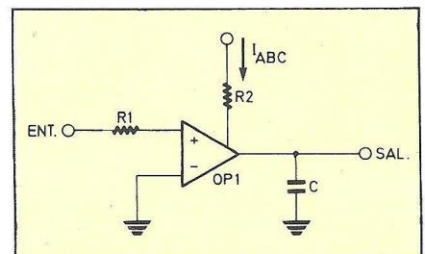
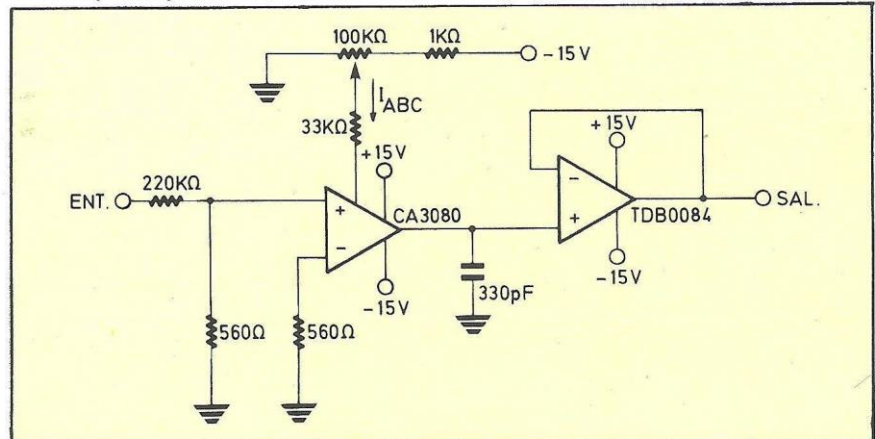
Otras veces se recurre a emplear un FET como resistencia variable. En la figura 3 se muestra un circuito de este tipo, en el que la tensión de



3. Filtro paso-bajo de frecuencia variable con FET.

tro) se fija con ayuda de la resistencia ajustable de 100 kΩ. El segundo operacional sirve de separador, pre-

5. Filtro paso-bajo de frecuencia variable con OTA.



4. Integrador con OTA.

sentando una elevada impedancia de carga al condensador del integrador.