

Alterna y continua

La práctica totalidad de los circuitos electrónicos necesitan ser alimentados con corriente continua para su funcionamiento. Los pocos que se salvan de esta regla son aquellos que utilizan triacs y, en algunos casos, tiristores, que actúan directamente sobre la corriente alterna. Sin embargo, la distribución de energía eléctrica tanto para la industria como para aplicaciones caseras se hace siempre en forma de corriente alterna, por razones que ahora no vamos a analizar aquí. Se precisa, por lo tanto, una conversión de alterna a continua, función que se encomienda a la llamada *fuentes de alimentación*.

La energía eléctrica alterna tiene sus parámetros eléctricos normalizados. Así, la frecuencia es de 50 Hz (60 Hz en algunos países americanos), y se emplean tensiones eficaces de 220 ó 125 V para redes caseras (otras tensiones comprendidas entre 110 y 240 V pueden también encontrarse), y trifásicas de 220 ó 380 V por fase para instalaciones industriales. Por el contrario, los equipos electrónicos trabajan con tensiones muy diversas, que pueden oscilar entre tan sólo 1 V para algunos equipos mi-

los positivos). El secundario del transformador para este último tipo de rectificador debe llevar dos arrollamientos, o uno con toma central. Finalmente, el rectificador en puente utiliza cuatro diodos, aprovechando también tanto los semiciclos positivos como los negativos de la tensión alterna; en contrapartida a la necesidad de emplear cuatro diodos, el transformador que se necesita es de secundario simple.

Filtros

La tensión (o corriente) obtenida del conjunto de un transformador (cuando es necesario) y un rectificador es continua (tiene siempre el mismo sentido o polaridad), pero no constante, puesto que varía de acuerdo a como lo hace la de red (variación senoidal). Para eliminar en lo posible tal variación se utilizan los *filtros*.

El filtro más sencillo está constituido por un *condensador* de elevada capacidad en paralelo con el circuito a alimentar. Cuando la tensión proporcionada por el rectificador aumenta, el condensador se carga y almacena energía. Cuando la tensión del rectificador tiende a bajar, siguiendo la forma senoidal, el con-



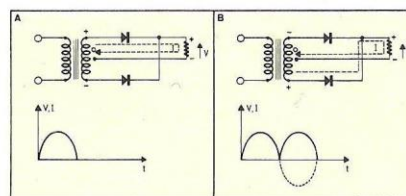
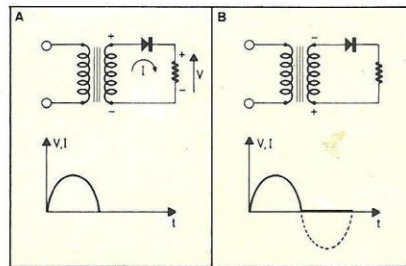
Función de la fuente de alimentación.

niatura (audífonos, equipos médicos, etc.), y varios miles de voltios (para tubos de televisión, equipos de transmisión, etc.), pasando por todos los valores intermedios, según la aplicación concreta.

Conversión alterna-continua

Por esta razón, el primer elemento de que consta una fuente de alimentación es de un *transformador* que adapta la tensión de red al valor que vaya a necesitarse en continua. Tal

Rectificador de media onda. A) Semiciclos positivos. B) Semiciclos negativos.

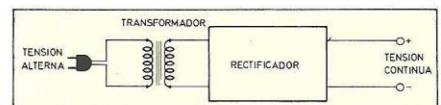
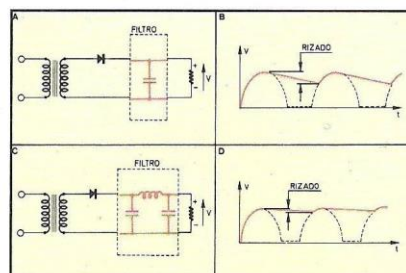


Rectificador de onda completa. A) Semiciclos positivos. B) Semiciclos negativos.

densador entrega parte de la energía en él almacenada, haciendo que la disminución de la tensión sobre la carga sea menos brusca.

Otro filtro utilizado a menudo consiste en interponer una *bobina* de elevada inductancia en serie con la carga. El efecto es similar al logrado con el condensador, aunque mientras que éste actúa sobre la *tensión*

Rectificador en puente. A) Semiciclos positivos. B) Semiciclos negativos.

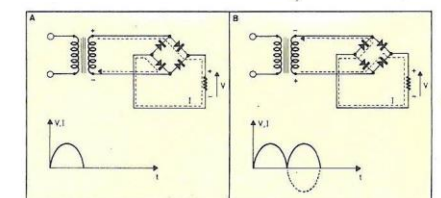


Esquema general de una fuente.

transformador suele ser reductor (secundario de menor tensión que el primario) en la mayoría de los equipos con semiconductores, y elevador en los equipos de válvula. Otras veces se utiliza el transformador como aislador, más que como «cambiador» de tensión.

Con la tensión alterna ya en el valor adecuado, se procede a convertirla en continua, proceso que lleva a cabo el *rectificador*. Como rectificadores se emplean siempre diodos, bien del tipo semiconductor o de vacío; en algunas ocasiones, también pueden utilizarse tiristores. Antiguamente se han empleado vibradores mecánicos, hoy totalmente en desuso.

Hay tres tipos básicos de rectificador. El llamado de *media onda*, elimina los semiciclos positivos (o los negativos) de la tensión alterna, consiguiendo que la corriente circule siempre en el mismo sentido. Un rectificador de *onda completa* aprovecha ambos semiciclos, invirtiendo el sentido de los negativos (o



Distintos filtros y su efecto sobre el rizado. A y B) Filtro a condensador. C y D) Filtro en pi.

en la carga, aquélla actúa sobre la *corriente* en la misma.

Combinando dos condensadores y una bobina se consigue el *filtro en pi*, llamado así por la disposición de sus componentes. El efecto del filtraje es mucho mayor que en los anteriores, dado que son ahora varios los elementos que colaboran a mantener constante la tensión y/o corriente de alimentación.

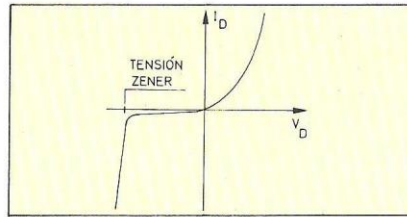
La eficacia de un filtro puede medirse por la amplitud del llamado *rizado* de la tensión continua, que es la variación remanente de la tensión que queda después de pasar por el filtro. El rizado puede especificarse por su tensión (por ejemplo, 50 mV pico-pico) o por el valor relativo respecto de la tensión continua (por ejemplo, un rizado de -40 dB tiene una amplitud del 1 % de la tensión continua que lo lleva).

El diodo Zener

Cuando un diodo semiconductor se polariza en inversa (cátodo positivo; ánodo negativo) circula por él una muy pequeña corriente (del orden del microamperio o menor) mientras que el valor de la tensión inversa es menor que un cierto valor, denominado *tensión Zener*, momento en el que la corriente inversa a su través aumenta mientras permanece constante la tensión sobre sus bornas.

La tensión Zener es una constante para cada diodo. Cuando un diodo va a emplearse como rectificador, interesa que tal valor sea lo más elevado posible, para que durante su funcionamiento normal no llegue a aplicarse una tensión inversa tan alta, lo que desvirtuaría el proceso de rectificación.

Sin embargo, se fabrican diodos cuya tensión Zener es conocida dentro de pequeños márgenes (± 5 y ± 10 % son tolerancias corrientes), y cuyos valores concretos oscilan entre unos pocos voltios (2,7 V) y algunos cientos de voltios (200 V). Tales componentes resultan muy útiles, puesto que, como ya hemos dicho más arriba, la tensión entre sus extremos permanece *constante* (e

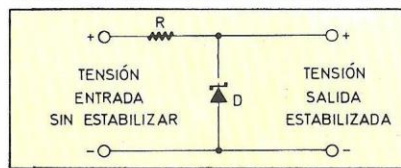


Característica tensión-corriente de un diodo semiconductor.

igual a la tensión Zener) independientemente de la corriente que los atraviese.

El circuito típico de aplicación se muestra en la figura 2, en donde la resistencia R absorbe la caída de tensión entre la entrada sin estabilizar y la salida estabilizada. Para una tensión de entrada que puede variar entre 12 y 14 V (por ejemplo, en un automóvil), un diodo Zener de 9,1 V (por ejemplo, el BZX85/C9V1) y una resistencia de 39 Ω - 1 W puede alimentarse un circuito con 9 V que

Circuito de estabilización con diodo Zener.



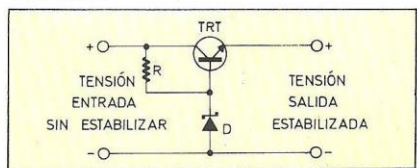
consume un máximo de 70 mA con una variación en la tensión de tan sólo $\pm 0,15$ V.

Empleo de transistores

La limitación más importante que tienen los diodos Zener es que deben absorber a su través la corriente que *no* consume la carga, lo que supone una importante disipación de calor, sobre todo para tensiones Zener altas. Esto puede solucionarse parcialmente con la utilización de un transistor dispuesto como se indica en la figura 3.

En este nuevo circuito, el diodo Zener alimenta la base del transistor, mientras que el circuito a alimentar se conecta al emisor. Así, la corriente que suministra el diodo Zener se ve amplificada por el transistor, trabajando con una disipación mucho más pequeña. Empleando un transistor BD433, un diodo Zener

Circuito de estabilización con diodo Zener y transistor.



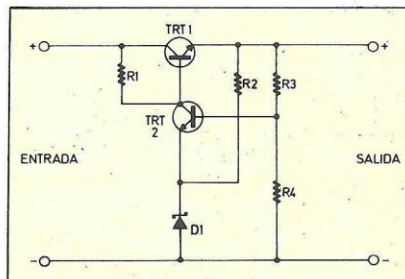
BZX83/C9V1 y una resistencia de 270 Ω , puede alimentarse un circuito a 8,5 V que consume hasta 500 mA con una variación máxima de 0,1 V en la tensión de salida.

Circuitos completos

Un circuito muy empleado es el que se muestra en la figura 4. En él, el diodo Zener D1, alimentado a través de R2, suministra una tensión de referencia fija al emisor de TRT2. Puesto que la tensión base-emisor de un transistor es constante (unos 0,6 V), la tensión de la base de TRT2 también será fija (0,6 V superior a la del diodo Zener).

Como, por otra parte, la tensión de base de TRT2 viene fijada por el divisor de tensión R3-R4 como una fracción de la de salida, si aquélla es fija, también debe serlo la de salida. Por tanto, la tensión de salida viene dada, fundamentalmente, por los valores de R3, R4 y el diodo Zener empleado para D1.

La resistencia R1 suministra las corrientes de base de TRT1 (que, a su vez, es una fracción de la de la carga) y de colector de TRT2. Supongamos que tal corriente es constante (lo que puede conseguirse haciendo R1 de gran valor). Los transistores se repartirán dicho valor de

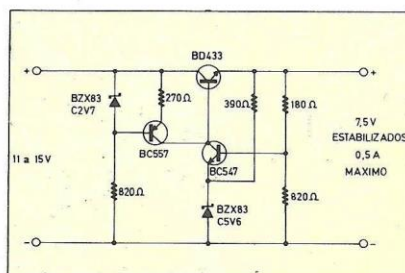


Circuito estabilizador de tensión completo.

forma que el circuito permanezca en equilibrio.

Si ahora, por cualquier motivo, la tensión en la salida aumenta, la tensión en la base de TRT2 también aumentará (debido al divisor R3-R4). Como la tensión en el emisor de

Estabilizador de la tensión de la batería de un coche a 7,5 V-0,5 A.



TRT2 es constante (e igual a la tensión Zener de D1), el aumento en la tensión de base provocará un aumento en la corriente de colector de TRT2.

Si, como se ha supuesto, la corriente que suministra R1 es constante, al aumentar la de colector de TRT2, debe disminuir la de base de TRT1. Si esta última disminuye, también lo hará la de su emisor (que es, precisamente, la de la carga). Tal disminución hará que disminuya la tensión en la salida, lo que compensará automáticamente el aumento inicial que se había supuesto. De forma similar actuará el circuito cuando la tensión de salida tienda a disminuir.

Todo el funcionamiento se apoya en el hecho de que la corriente que atraviesa R1 es constante. Cuanto más cierto sea este extremo, más estabilizada será la tensión de salida. En el circuito de la figura 5 se ha sustituido la resistencia R1 por un conjunto de elementos que funcionan como un generador de corriente constante, con lo que se consigue reducir a un mínimo las fluctuaciones de la salida. Con los valores indicados, se puede conseguir una corriente de salida de hasta 0,5 A con una variación de la tensión de salida menor de 50 mV.

Diodos

Se denomina *rectificación* al proceso por el cual una corriente alterna es convertida en otra continua. El resultado, en general, es una corriente que se suele denominar *pulsante*, debido a la forma de onda obtenida. En muy raras ocasiones se obtiene una corriente constante de una rectificación.

El componente más ampliamente utilizado como rectificador es el diodo, dada su propiedad de conducir corriente a su través en un solo sentido. En la figura 1 se muestra un circuito rectificador con un solo diodo; tal combinación suele denominarse *de media onda*, dado que

tan sólo se da paso a los semiciclos de un mismo signo.

En la figura 2 se da un rectificador *de onda completa*, en el que ambos semiciclos de la señal alterna son convertidos en corriente continua. La figura 3 presenta una combinación de cuatro diodos que efectúan una rectificación en onda completa sin necesidad de un transformador con toma media. Los diodos así dispuestos se dice que forman un *punte*.

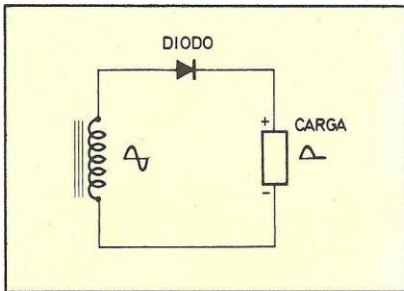
Operacionales

La rectificación de una señal puede hacerse con distintas finalidades: obtener una tensión continua de

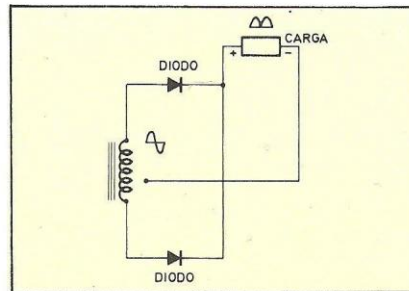
alimentación a partir de la red, detectar la modulación de una portadora, averiguar la tensión de pico máxima de un tren de ondas, etc. Evidentemente, todo proceso de rectificación presenta pérdidas e imprecisiones. Así, los diodos, cuando conducen, no lo hacen de forma ideal (resistencia nula); ni cuando están bloqueados son un circuito abierto perfecto (resistencia infinita).

Tales imperfecciones en una fuente de alimentación no suelen ser factores limitativos de diseño, sino sólo de rendimiento del conjunto, lo que no suele ser inconveniente. En cambio, en un proceso de demodulación, en el que pueden estarse ma-

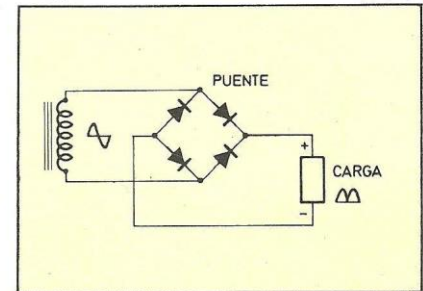
1. Rectificador de media onda.



2. Rectificador de onda completa.



3. Rectificador en puente.



nejando señales de algunos milivoltios, tales errores pueden llegar a ser inaceptables.

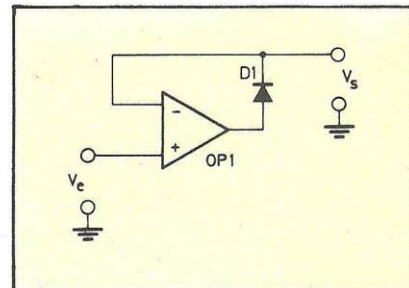
Por esta razón, y cuando se requieren circuitos de gran precisión, suele recurrirse a los amplificadores operacionales. Un circuito rectificador de media onda se muestra en la figura 4.

Cuando la tensión de entrada es positiva, la salida del operacional también lo es, polarizando el diodo D1 en directo. Esto hace que tal componente pueda hacerse equivaler a un cortocircuito, con lo que el montaje se comporta como un amplificador de ganancia unidad.

Cuando la tensión de entrada es negativa, también lo es la de salida, quedando polarizado el diodo en inversa, con lo que se comporta como un circuito abierto. Al no haber realimentación salida-entrada, la ganancia del conjunto será nula, y también la tensión de salida.

En un circuito como el descrito, las imperfecciones del diodo son prácticamente obviadas gracias a la elevada ganancia del operacional, con lo que se consigue una rectificación de elevada precisión.

Tal como se ha descrito, la tensión de salida (V_s) se compone de los semiciclos positivos de la tensión de

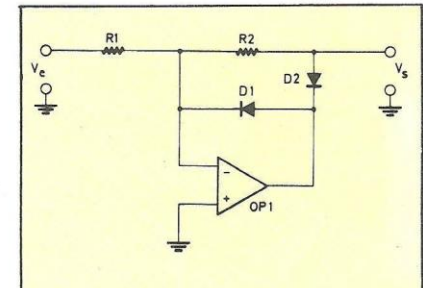


4. Rectificador de media onda con operacional.

entrada (V_e). Si la polaridad del diodo D1 se invierte, el circuito sólo permitirá el paso a su través de los semiciclos negativos.

Rectificaciones con ganancia

Otro circuito también muy utilizado es el de la figura 5. En él, cuando la tensión de entrada es positiva, la salida se hace negativa, polarizando el diodo D1 en inversa, con lo que queda fuera de circuito. En cambio, D2 se polariza en directo, actuando como un cortocircuito, por lo que el conjunto equivale a un amplificador inversor cuya ganancia está controlada por los valores de R1 y R2. Cuando la tensión de entrada se



5. Rectificador de media onda con ganancia.

hace negativa, la salida del operacional es positiva, polarizándose ahora D2 en inversa y D1 en directa. Así, D1 representa un cortocircuito entre la salida del operacional y su entrada negativa, por lo que la ganancia del circuito se hace cero. La ventaja de este circuito frente al anterior es la de que con él puede obtenerse una cierta amplificación (o atenuación) aparte del efecto rectificador. Invertiendo la polaridad de *ambos* diodos el conjunto dejará pasar sólo los semiciclos negativos de la señal de entrada. Debe notarse, no obstante, que el operacional está montado como *inversor*, por lo que la polaridad de los semiciclos a la salida es opuesta a la de los que rectifica.

Onda completa

Para lograr la rectificación de ambos semiciclos de la señal de entrada se suele recurrir a dos rectificadores de media onda, cada uno de los cuales se encarga de los semiciclos de una determinada polaridad. La salida de ambos es mezclada adecuadamente para conseguir el efecto deseado.

Así, en el circuito de la figura 1, el operacional OP1 y sus elementos asociados se encargan de eliminar los semiciclos negativos de la señal de entrada, mientras que OP2 elimina los positivos. Las salidas de ambos rectificadores se «restan» gracias al operacional OP3, con lo que a su salida se obtiene la señal de entrada rectificada en onda completa.

Para que no existan desimetrías, la «ganancia» proporcionada a los semiciclos positivos debe ser idéntica a la de los negativos, por lo que si se requiere gran exactitud, deben emplearse resistencias de elevada precisión, o debe disponerse de algún elemento que permita ajustar la simetría.

La tensión de salida (V_s) de la figura 1 es positiva. Si se desea que la forma sea idéntica, pero negativa, debe cambiarse la polaridad de los diodos D1 y D2. La función de OP1 y OP2 puede ser realizada por un sólo operacional, tal como muestra la figura 2, en la que V_s es negativa.

Otros circuitos

En la figura 3, el operacional OP1 permite el paso de los semiciclos

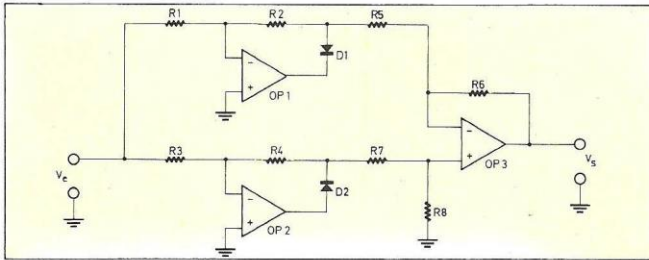
positivos de la señal de entrada, mientras que OP2 se encarga de sumar y amplificar las señales procedentes de la salida de OP1 y de la entrada (V_e).

Si se eligen adecuadamente los valores de las resistencias del circuito, puede conseguirse que la ganancia proporcionada por OP2 a la señal de salida de OP1 sea justamente el doble de la proporcionada a la señal de entrada, con lo que la salida de OP2 será, precisamente, la señal rectificada en onda completa de la tensión de entrada, como se muestra gráficamente en la figura 4.

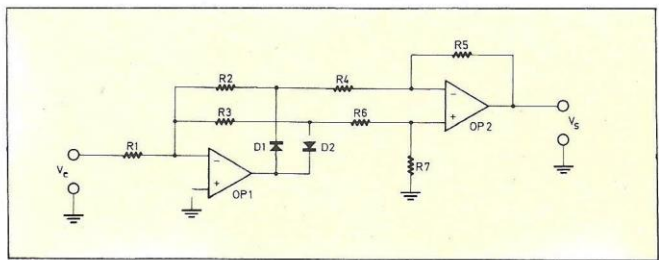
Salida en continua

Por lo general, siempre que se rectifica una señal alterna se hace para obtener una tensión continua proporcional a la amplitud de los picos

1. Rectificador onda completa. Salida positiva.



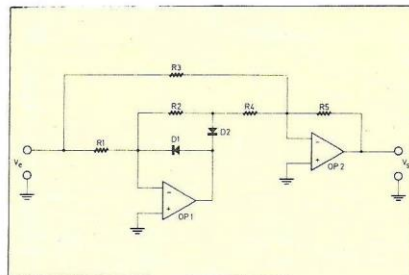
2. Rectificador onda completa. Salida negativa.



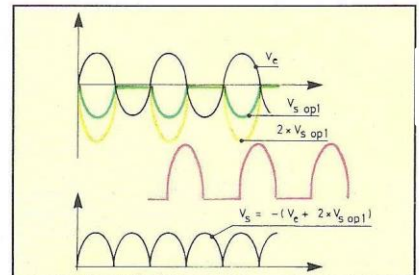
de dicha señal, bien para alimentar un circuito, o para recuperar la modulación de una portadora. Por esta razón, un rectificador va seguido casi siempre por un filtro, o circuito capaz de obtener la citada tensión continua.

El filtro más sencillo que puede utilizarse para esta aplicación es el constituido por un simple condensador en paralelo con la resistencia de realimentación del último operacional de la cadena. La constante de tiempo de tal conjunto paralelo debe ser, como mínimo, de unas 5 a 10 veces superior al período de la señal de frecuencia más baja que deba ser tratada por el circuito.

Así, por ejemplo, en la figura 5 se da un circuito práctico que puede sustituir a un demodulador de amplitud. Entrega a la salida una señal de audio de 150 mV eficaces cuando a su entrada se aplica una señal de 500 mV eficaces cuya frecuencia esté comprendida entre 450 y 490 kHz (frecuencia intermedia típica) y esté modulada en amplitud con una profundidad de un 30 %. Adicionalmente, puede obtenerse una tensión negativa respecto de masa para un circuito de control automático de ganancia (CAG) de 0,7 V para la entrada nominal.

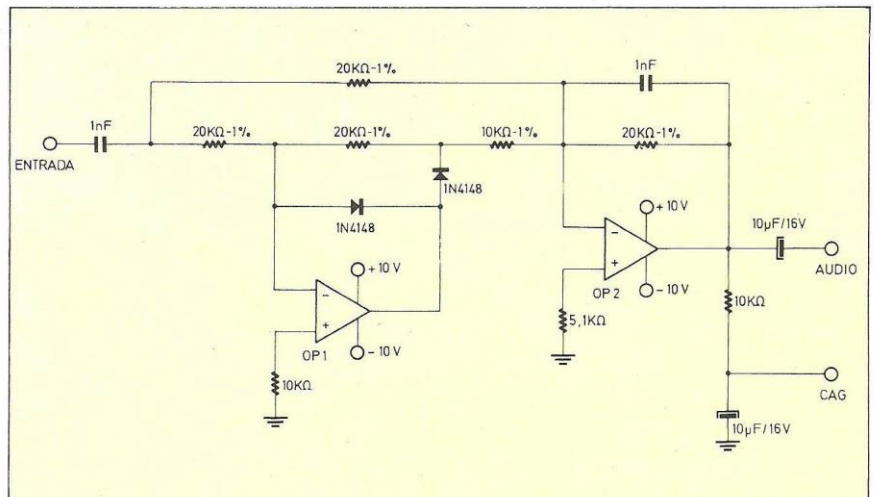


3. Rectificador onda completa.



4. Formas de onda en un rectificador como el de la figura 3.

5. Detector de modulación de amplitud. Los operacionales OP1 y OP2 deben ser del tipo LM318 ó SFC2318.



Tensión de referencia

La casi totalidad de los reguladores de tensión empleados en la práctica comparan la tensión de salida del mismo con una referencia lo más estable posible. El resultado de tal comparación es una señal de error. Según el signo y magnitud del error, el regulador toma la acción pertinente para variar la tensión de salida, de forma que el error sea nulo. Como parece claro, cuanto más estable sea la tensión de referencia empleada, mayor estabilidad presentará la tensión de salida. Por tal razón, para obtener la tensión de referencia suelen emplearse circuitos con diodos Zener, e incluso reguladores de tensión completos. El esquema de bloques más general que puede darse de un regulador de tensión es el de la figura 1. En él se

emplea como comparador un amplificador operacional. Cuando la tensión de salida es superior a la de referencia, la señal de error es negativa, y el circuito regulador serie tiende a disminuir dicha tensión. Lo contrario ocurre cuando la tensión de salida es inferior a la de referencia.

Regulador serie

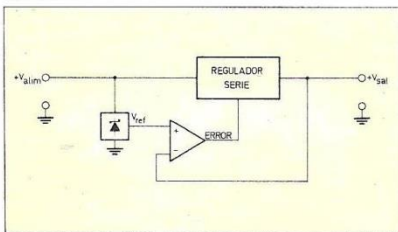
El circuito gobernado por la señal de error suele ser un simple transistor, o una combinación equivalente. El colector del mismo se conecta a la tensión de alimentación, la señal de error actúa sobre la base, y del emisor se toma la tensión de salida. Si se desea obtener una tensión de salida ajustable puede variarse la tensión de referencia. Sin embargo,

es mucho más fácil conseguir una referencia estable cuando es siempre del mismo valor, que cuando se hace variable. Por esta razón, la solución apuntada no es la más idónea.

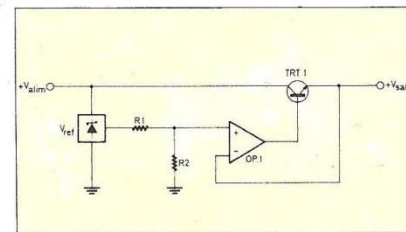
En la práctica se parte siempre de una tensión de referencia fija y lo más estable posible. Si se desea una tensión de salida igual o inferior a la de referencia, se dispone un divisor resistivo tal como se muestra en la figura 2. Así, en la entrada positiva de OP1 aparece una tensión inferior a la de referencia, cuyo valor viene fijado por R1 y R2, y que será igual a la de salida.

En cambio, si se desea una tensión de salida igual o superior a la de referencia, se empleará el montaje de la figura 3, en el que la tensión llevada a la entrada negativa de OP1 es

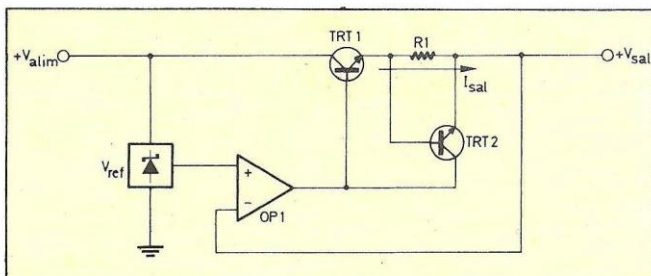
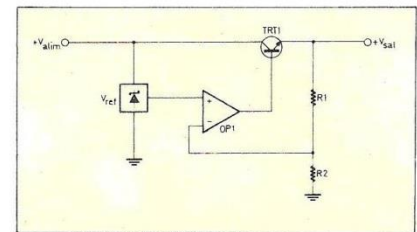
1. Configuración básica de un regulador de tensión.



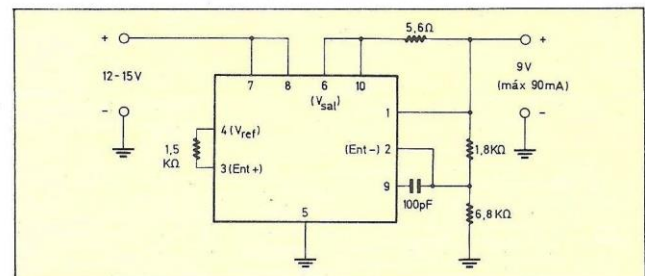
2. Tensión de salida inferior a la de referencia.



3. Tensión de salida superior a la de referencia.



4. Limitación de la corriente de salida.



5. Regulador de tensión práctico. El circuito integrado debe ser del tipo 723 con cápsula metálica (TO100).

una fracción de la de salida, fracción que deberá ser igual a la de referencia. Evidentemente, si el divisor de tensión (R1/R2) se hace variable (incluyendo un potenciómetro), la tensión de salida podrá elegirse dentro de unos ciertos márgenes.

Limitador de corriente

Si en serie con la corriente de salida se dispone una resistencia, la caída de tensión sobre ella será proporcional a dicha corriente. Si tal tensión se lleva a la unión emisor-base de un transistor, éste permanecerá bloqueado mientras que la tensión se mantenga por debajo de la de umbral (unos 0,6 V para transistores de silicio), y entrará en conducción cuando dicha tensión sea superada.

Tal montaje, por tanto, es capaz de detectar cuándo la corriente de salida supera un cierto valor, y puede emplearse para limitarla a un valor seguro para el regulador, el transistor serie o el circuito que se está alimentando. El montaje típico es el mostrado en la figura 4.

El valor de la corriente de salida a la cual TRT2 comienza a limitar puede elegirse tomando para R1 el valor adecuado, que puede obtenerse, aproximadamente, de la ecuación:

$$R1 = \frac{600}{I_{lim}}$$

en donde I_{lim} viene medida en miliamperios. Cuando la corriente de salida supera este valor, TRT2 se hace conductor, y su colector absorbe parte de la corriente suminis-

trada por la salida de OP1. Así, la corriente de base de TRT1 disminuye, y con ella lo hace la de salida. Existen componentes en el mercado que engloban todos los circuitos antes comentados en una sola cápsula, tal como el denominado genéricamente 723. En él, la tensión de referencia típica es de 7,15 V, y puede suministrar un máximo de 150 mA en su salida (dependiendo de la tensión de alimentación y de la temperatura).

En la figura 5 se muestra un circuito capaz de entregar 9 V a su salida a partir de una tensión comprendida entre 12 y 15 V (batería de automóvil, por ejemplo). La corriente de salida está limitada a unos 90 mA, y con él puede alimentarse un receptor de radio de tamaño medio.