

AMPLIFICADORES OPERACIONALES CON DIODOS

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Al terminar la lectura de este capítulo sobre amplificadores operacionales con diodos, será capaz de:

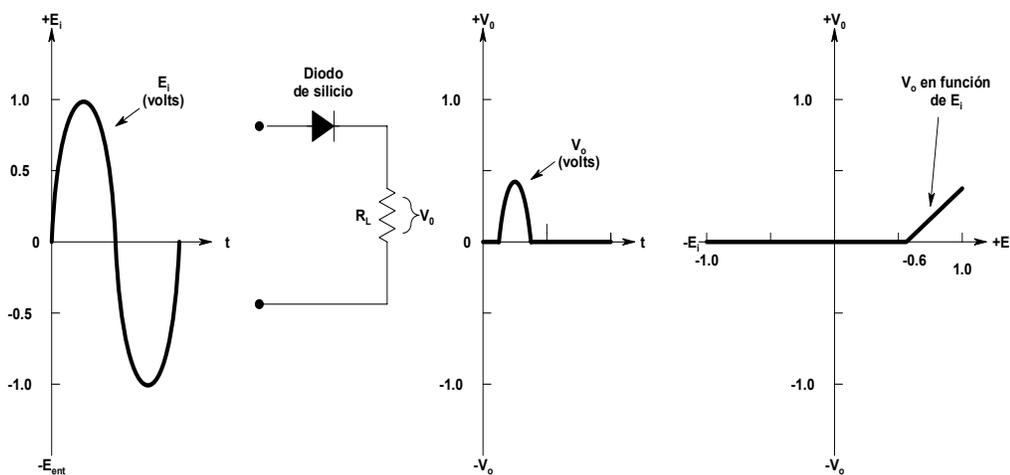
- Dibujar el circuito de un rectificador de media onda (o lineal) de precisión.
- Mostrar el flujo de corriente y los voltajes de circuito en un rectificador de media onda de precisión, tanto para entradas positivas como negativas.
- Hacer lo mismo para el caso de rectificadores de onda completa de precisión.
- Explicar el funcionamiento de un circuito detector de picos.
- Añadir un capacitor de media onda de precisión y de esta manera construir un circuito convertidor de ca a cd (valor medio).
- Explicar el funcionamiento de los circuitos de zona muerta.
- Dibujar circuitos recortadores de precisión y explicar cómo funcionan.

Amplificadores operacionales con diodos

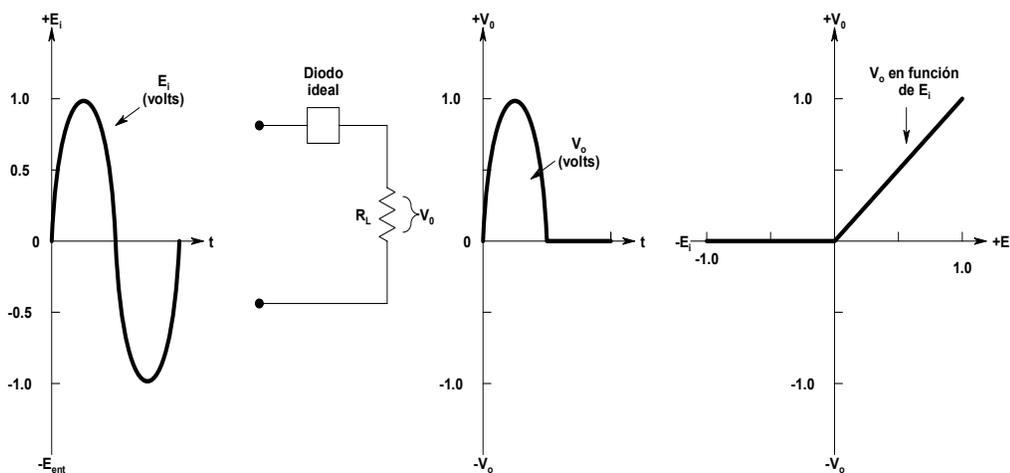
- Mencionar, por lo menos, cinco áreas en las que se utilizan los rectificadores de precisión.
- Simular con PSpice circuitos de amplificadores operacionales con diodos.

1. INTRODUCCIÓN A LOS RECTIFICADORES DE PRECISIÓN

La principal limitación de los diodos de silicio comunes es que no son capaces de rectificar voltajes por debajo de 0.6 V. Por ejemplo, en la figura 1(a) se muestra que V_o no responde a entradas positivas inferiores a 0.6 V, para el caso de un rectificador de media onda construido con un diodo de silicio ordinario. En la figura 1(b) se muestran las formas de onda de un rectificador de media onda construido con un diodo ideal. Siempre que haya voltajes.



(a) Los diodos reales no son capaces de rectificar pequeños voltajes de ca debido a la caída de Voltaje del diodo de 0.6V.



Un circuito rectificador de media onda lineal, o de precisión, Rectifica con exactitud cualquier señal de ca, independientemente de la amplitud y se comporta como diodo ideal

Figura 1. Un diodo común de silicio necesita 0.6 V de polarización directa para poder conducir. Por lo tanto, no es capaz de rectificar voltajes de ca pequeños. Mediante un circuito rectificador de media onda de precisión se elimina esta limitación.

de entrada positivos se producirá un voltaje de salida, aun cuando dichos voltajes estén por debajo de 0.6 V. Para diseñar un circuito que se comporte como diodo ideal se utiliza un amplificador operacional y dos diodos comunes, se obtiene así un poderoso circuito capaz de rectificar señales de entrada, incluso de unos cuantos milivolts.

El bajo costo de este circuito, equivalente a un diodo ideal, permite utilizarlo de manera sistemática en diversas aplicaciones. Estas pueden clasificarse de manera general en: rectificadores de media onda lineales y rectificadores de onda completa de precisión.

1. *Rectificadores de media onda lineal.* El circuito rectificador de media onda lineal produce una salida que depende de la magnitud y *polaridad* del voltaje de entrada. Más adelante se mostrará cómo se modifica el circuito rectificador de media onda lineal a fin de usarlo en diversas aplicaciones de procesamiento de señales. Al rectificador de media onda lineal se le conoce también como *rectificador de media onda de precisión* y su comportamiento es el de un diodo ideal.
2. *Rectificadores de onda completa de precisión.* Mediante este circuito se obtiene una salida proporcional a la magnitud de la entrada, aunque no a la polaridad de ésta. Por ejemplo, hay salidas que son positivas a 2 V para entradas de +2V ó -2V. Dado que el valor absoluto de +2 V y de -2 V, al rectificador de onda completa de precisión también se le conoce como *circuito de valor absoluto*.

Entre las aplicaciones de los rectificadores lineales de media onda y de onda completa de precisión figuran:

1. Detección de señales de amplitud modulada.
2. Circuitos de zona muerta.
3. Circuitos *recortadores* o de límite preciso.
4. Interruptores de corriente.
5. Formadores de onda.
6. Indicadores de valor pico.
7. Circuitos de muestreo y retención.
8. Circuitos de valor absoluto
9. Circuitos promediadores
10. Detectores de polaridad de señal
11. Convertidores de ca a cd

Con frecuencia, las funciones anteriores se utilizan en el acondicionamiento de señales, antes de alimentarlas, a la entrada de un microcontrolador.

2. RECTIFICADORES DE MEDIA ONDA

2.1. Introducción

Los circuitos rectificadores de media onda transmiten solamente la mitad de un ciclo de una señal y eliminan el otro, al *limitar* su salida a cero volts. La mitad de ciclo que sí se transmite puede estar invertida o no. También puede experimentar una ganancia o atenuación, o permanecer inalterada en cuanto a la magnitud, todo lo cual dependerá de las resistencias elegidas y de la colocación de los diodos en el circuito del amplificador operacional.

2.2. Rectificador inversor de media onda lineal con salida positiva

Para convertir un amplificador operacional inversor en un rectificador de media onda ideal (de precisión lineal) se añaden dos diodos, como se muestra en la figura 2. En la figura 2(a) cuando E_i es positivo, el diodo D_1 conduce, con lo que el voltaje de salida del amplificador operacional, V_{OA} , se vuelve negativo en una caída de voltaje de un diodo (≈ 0.6 V). Lo anterior polariza inversamente al diodo D_2 . El voltaje de salida del circuito V_o es igual a cero debido a que la corriente de entrada I fluye a través de D_1 . Para propósitos prácticos, no fluye corriente por R_f y, por lo tanto, $V_o = 0$.

Observe que la carga se modela por medio de una resistencia R_L , la cual siempre deberá ser resistiva. Si la carga es un capacitor, un voltaje o una fuente de corriente, V_o no es igual a cero.

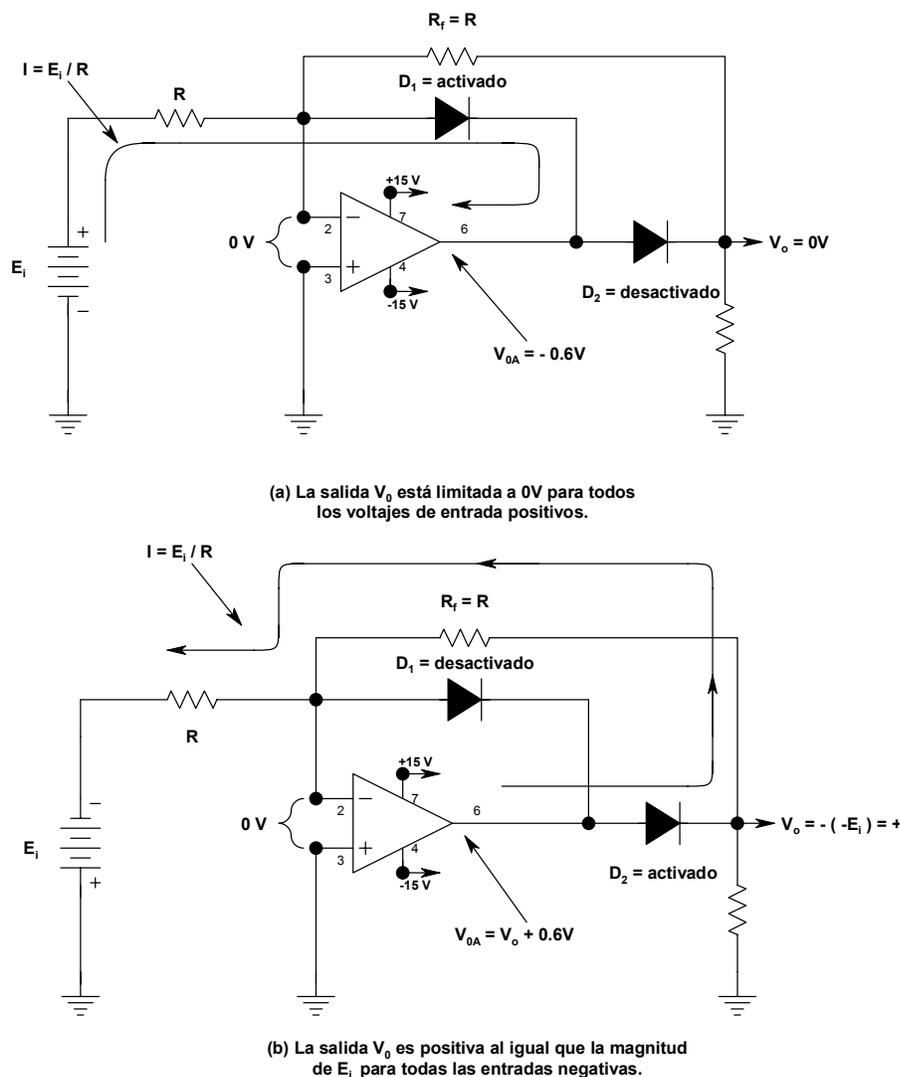


Figura 2. Por medio de los diodos se convierte un amplificador inversor en un rectificador de media onda lineal (ideal), inversor en un rectificador de media onda lineal (ideal), inversor de salida positiva. La salida V_o es positiva e igual a la magnitud de E_i cuando las entradas son negativas; V_o es igual a 0 V para todas las entradas positivas. Los diodos utilizados son el 1N914 ó el 1N4154.

En la figura 2(b), la entrada negativa E_i está forzando a la salida del amplificador operacional, V_{OA} , a volverse positiva; esto, a su vez, obliga a D_2 a conducir. El circuito se comporta, por lo tanto, como un inversor, dado que $R_f = R_i$ y a que $V_o = -(-E_i) = +E_i$. Dado que la entrada (-) está a potencial de tierra, se polariza inversamente al diodo D_1 . La corriente de entrada está definida por E_i/R_i y la ganancia por $-R_f/R_i$. No hay que olvidar que esta ecuación de la ganancia es válida sólo para el caso de entradas negativas, y que V_o sólo puede ser positiva o cero.

El funcionamiento del circuito se resume en las formas de onda de la figura 3. V_o solo puede ser positiva cuando responde linealmente a entradas negativas. Ahora se comentará la característica más importante de este rectificador de media onda. Un diodo de silicio común, o incluso un diodo de portadores de alta energía (*hot carrier diode*) necesitan de unos décimos de volts para que se puedan polarizar directamente. No se rectifican señales de voltaje que estén por debajo de este voltaje de umbral. Sin embargo, si se conecta el diodo en el lazo de retroalimentación del amplificador operacional, el voltaje de umbral del diodo casi se elimina totalmente. Por ejemplo, si en la figura 2(b) E_i es un voltaje de -0.1 V, E_i y R_i convertirán este bajo voltaje en una corriente que pasa a través de D_2 . V_{OA} asume el valor necesario para proporcionar la caída de voltaje que el diodo necesita más la caída de voltaje a través de R_f . De esta manera se pueden rectificar milivolts del voltaje de entrada, puesto que la polarización directa del diodo la proporciona automáticamente la acción de retroalimentación negativa del amplificador operacional.

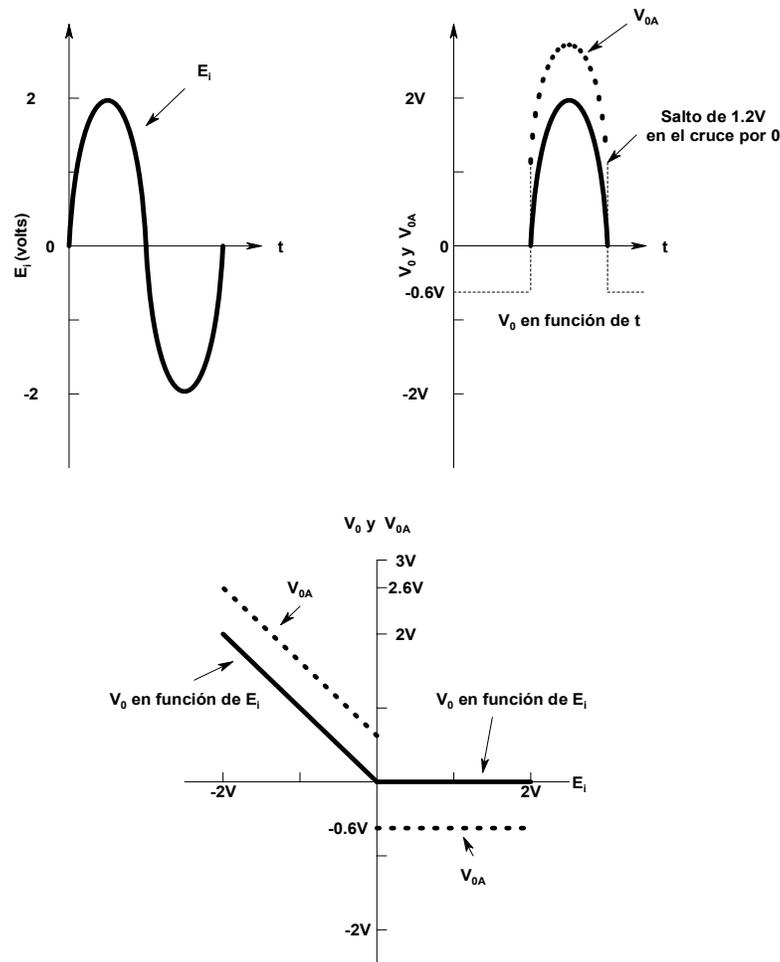
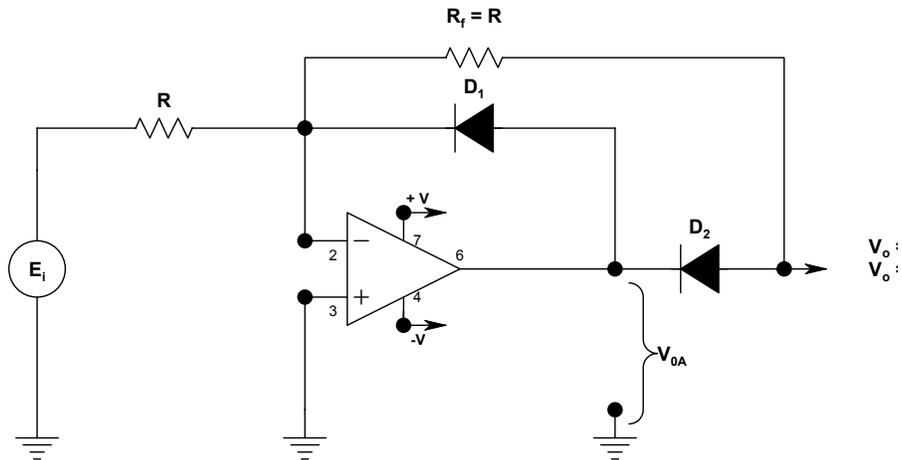


Figura 3. Características de entrada, salida y transferencia de un rectificador de media onda inversor ideal con salida positiva.

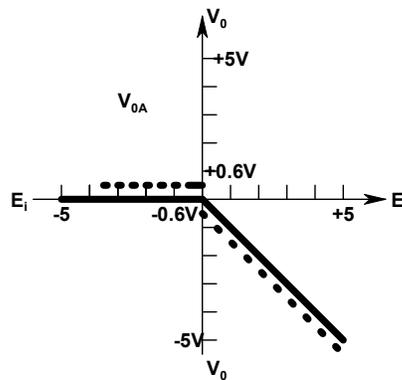
Por último, observe la forma de onda de la salida del amplificador operacional, V_{OA} , en la figura 3. Cuando E_i cruza el valor 0 V (cuando se está volviendo negativo), V_{OA} cambia súbitamente de $-0.6V$ a $+0.6V$, para dejar de proporcionar la caída de D_2 y proporcionarla a D_1 . Para monitorear este cambio se utiliza un diferenciador, el cual indicará el cruce por cero. Durante el cambio, el amplificador operacional funciona a lazo abierto.

2.3. Rectificador inversor lineal de media onda con salida negativa

Se pueden invertir los diodos de la figura 2 como se indica en la figura 4. Ahora solo se transmiten e invierten señales positivas de entrada. Para todas las entradas negativas, el voltaje de salida V_o es igual a 0 V. En la figura 4(b) el funcionamiento del circuito se resume en la gráfica de V_o y V_{OA} en función de E_i .



(a) Rectificador de media onda lineal inversor: salida negativa.

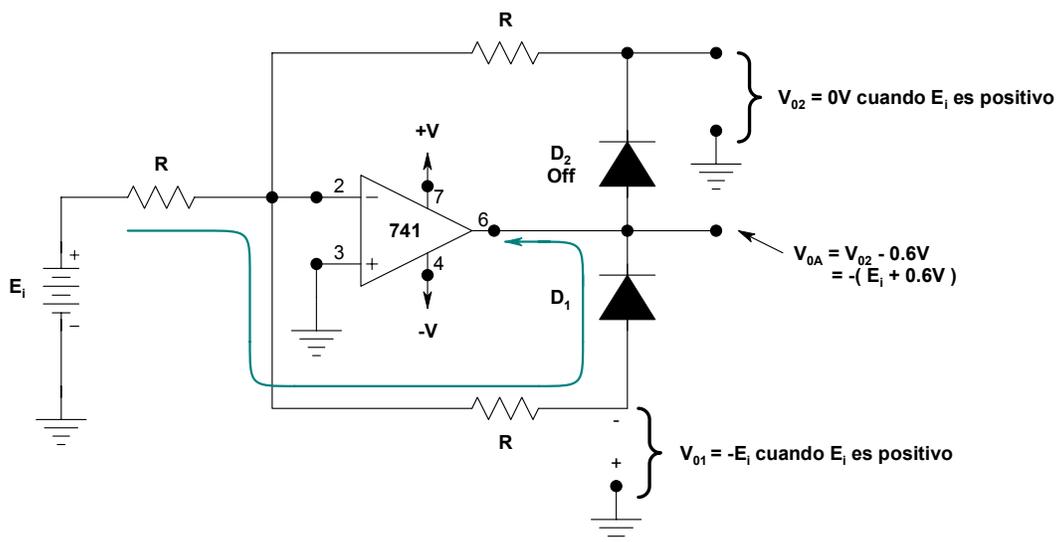


(b) Características de transferencia de V_o en función de E_i .

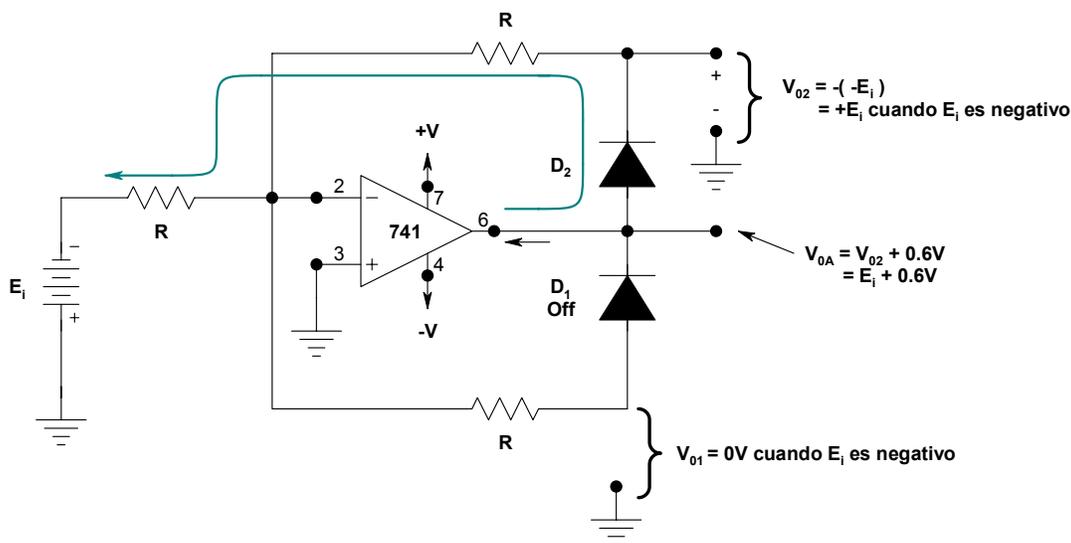
Figura 4. Al invertir los diodos de la figura 2 se obtiene un rectificador de media onda lineal inversor. Este circuito transmite solo señales de entrada positivas.

2.4. Separador de polaridad de señal

El circuito de la figura 5 es una ampliación de los circuitos de las figuras 2 y 4. En el caso de la figura 5(a), cuando E_i es positivo, el diodo D_1 conduce y sólo en la salida V_{01} se obtiene salida V_{02} está limitado a un valor de 0 V. Cuando E_i es negativo, D_2 conduce, $V_{02} = -(-E_i) = +E_i$ y V_{01} está limitado a 0 V. El funcionamiento de este circuito se resume en las formas de onda de la figura 6.



(a) Cuando E_i es positivo, V_{01} es negativo y V_{02} está limitado a 0V.



(a) Cuando E_i es negativo, $V_{01} = 0V$ y V_{02} se vuelve positivo.

Figura 5. Este circuito invierte y separa las polaridades de la señal de entrada E_i . La salida positiva en V_{02} indica que E_i es negativo y una señal negativa en V_{01} indica que E_i es positivo. Estas salidas deben ser acopladas.

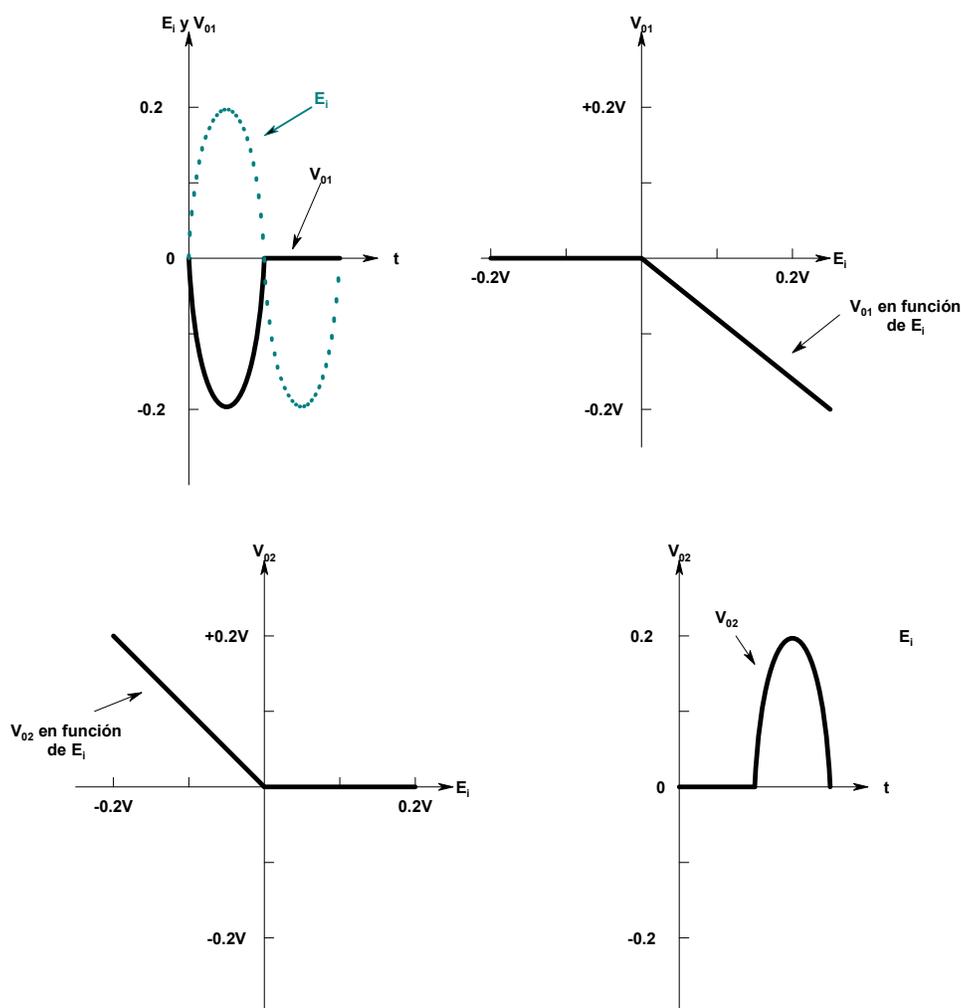


Figura 6. Voltajes de entrada y salida del separador de polaridad de la figura 5.

3. RECTIFICADORES DE PRECISIÓN: CIRCUITO DE VALOR ABSOLUTO

3.1. Introducción

El rectificador de onda completa de precisión transmite una polaridad de la señal de entrada e invierte la otra. Es decir, se transmiten los dos semiciclos de un voltaje alterno, pero convirtiéndolos a una sola polaridad de salida del circuito. Con un rectificador de onda completa de precisión se rectifican voltajes de entrada con amplitudes del rango de los milivolts.

Este tipo de circuito sirve para preparar señales para la multiplicación, promediación o demodulación. En la figura 7 se muestran las características de un rectificador ideal de precisión.

Al rectificador de precisión se le conoce también como circuito de *valor absoluto*. El valor absoluto de un número (o de un voltaje) es igual a su magnitud, independientemente de su signo. Por ejemplo, el valor absoluto de $|+2|$ y $|-2|$ son $+2$. el símbolo $| |$ significa “valor absoluto de”. En la figura 7 se muestra que la salida corresponde al valor absoluto de la entrada. En el caso de un circuito rectificador de precisión la salida puede ser positiva o negativa, dependiendo de cómo estén instalados los diodos.

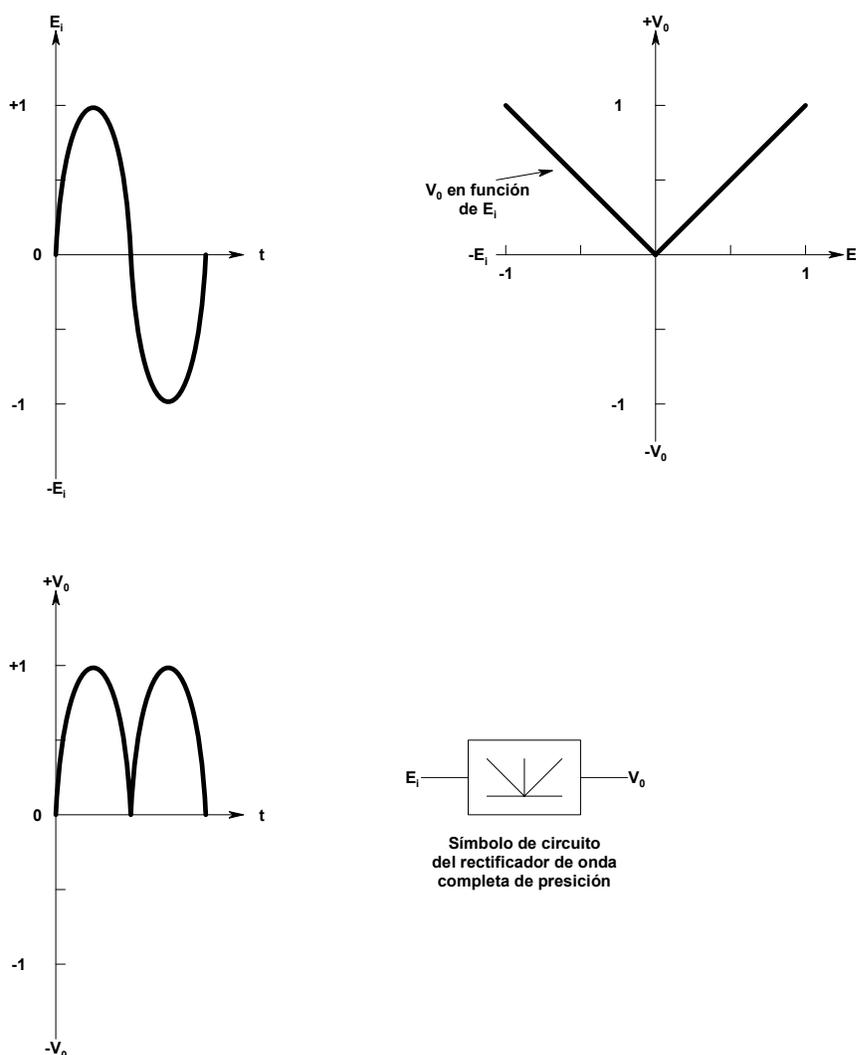
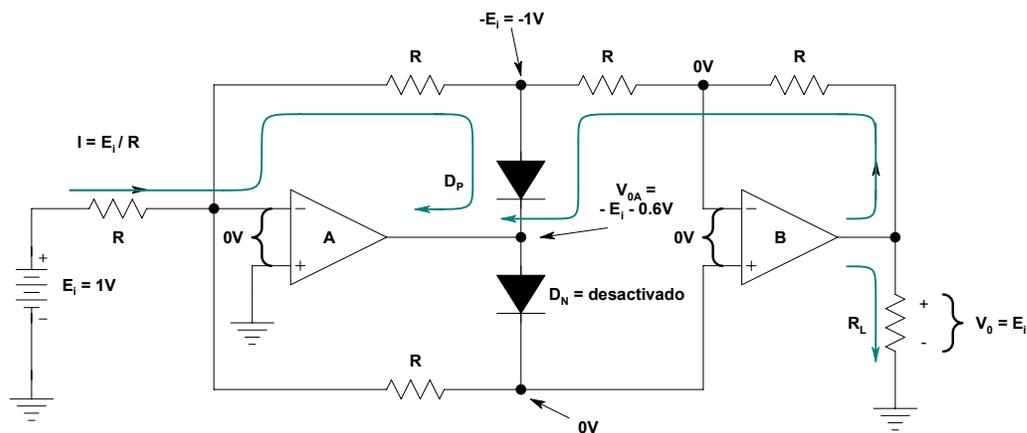


Figura 7. El rectificador de onda completa de precisión rectifica en su totalidad a los voltajes de entrada, incluso aquellos cuyos valores son inferiores al voltaje de umbral del diodo.

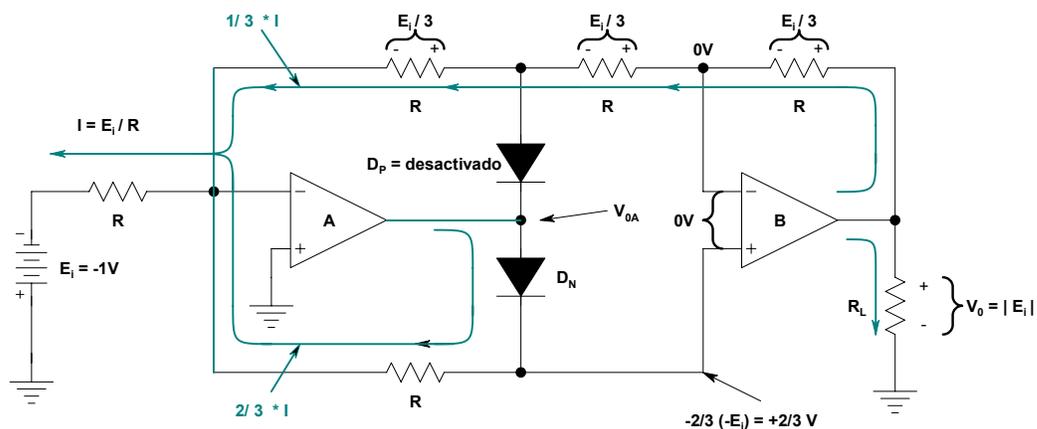
3.2. Tipos de rectificadores de onda completa de precisión

Se presentarán tres tipos de rectificadores de precisión. El primero es económico porque sólo utiliza dos amplificadores operacionales, dos diodos y cinco resistencias iguales. Desafortunadamente, su resistencia de entrada no es alta, por lo que se propone un segundo tipo que aunque no cuenta con una resistencia de entrada alta, tiene resistencias cuyas magnitudes son proporcionales en forma precisa, pero no iguales. Como ninguno de los tipos anteriores tiene un nodo de sumador potencial de tierra virtual, en la sección 7-4.2 se presentará otro tipo con el cual se puede promediar.

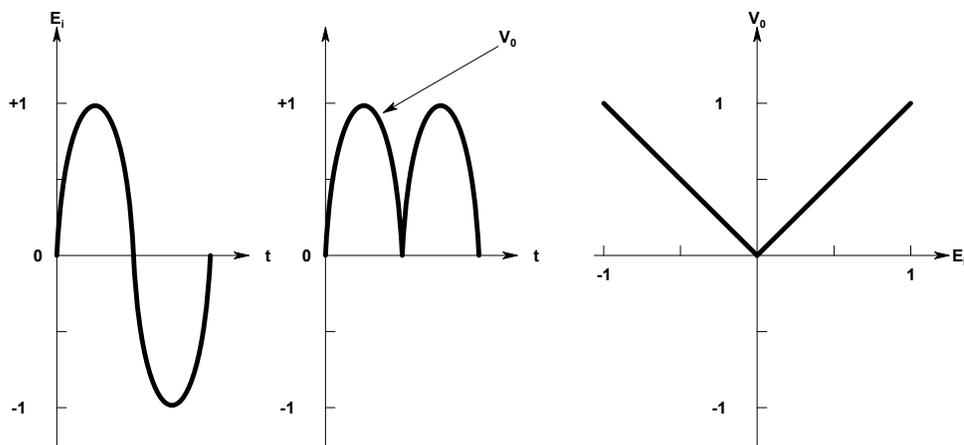
Rectificador de precisión de onda completa con resistencias iguales. El primer tipo de rectificador de precisión de onda completa, o circuito de valor absoluto, es el que se muestra en la figura 8. Todas las resistencias de este circuito son iguales y su impedancia de entrada es igual a R . En la figura 8(a) se muestran las direcciones de la corriente y las polaridades de voltaje para señales de entrada positivas. El diodo D_p conduce de manera que los amplificadores operacionales A y B funciona como inversores y $V_o = +E_i$.



(a) Cuando las entradas son positivas, D_p conduce; los amplificadores operacionales A y B se comportan como amplificadores inversores.



(b) Cuando las entradas son negativas, D_n conduce.



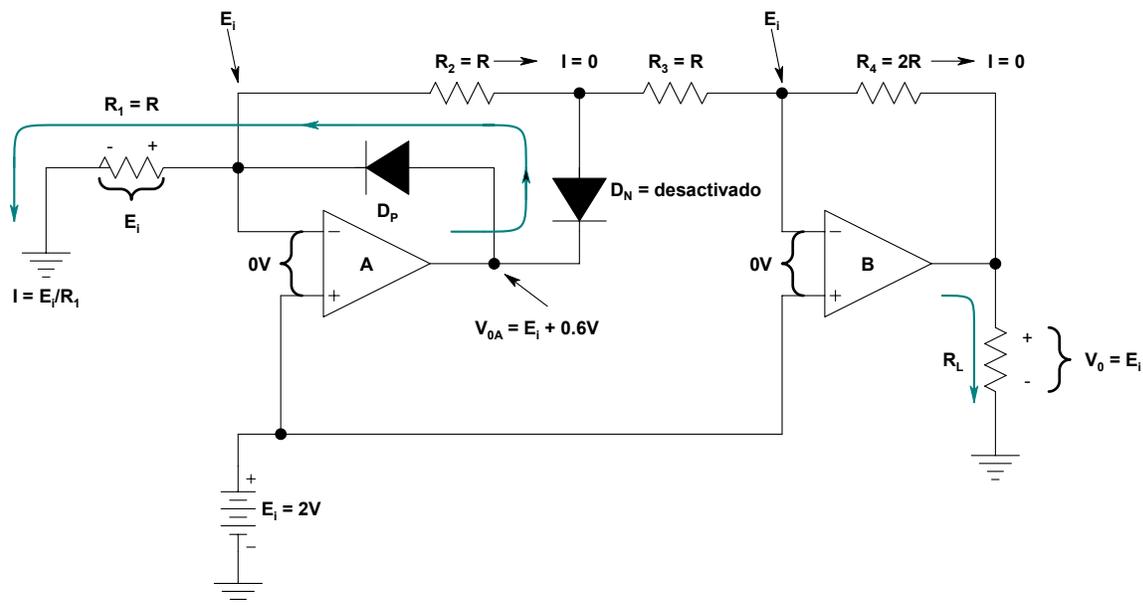
(c) Formas de las ondas.

Figura 8.

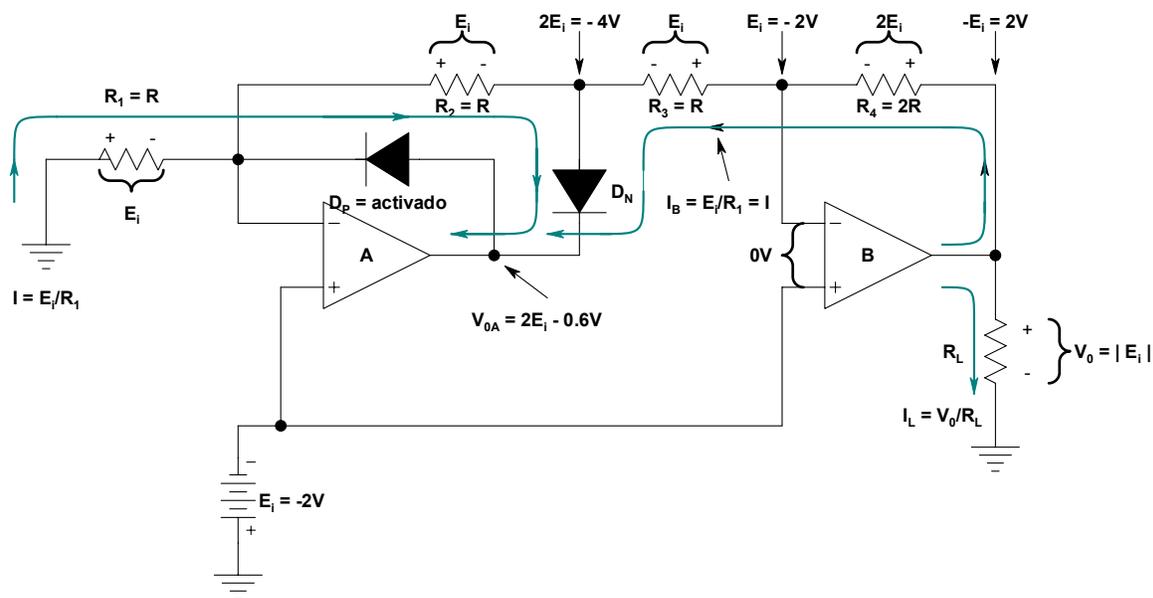
Circuito de valor absoluto o rectificador de onda completa de precisión, $V_o = |E_i|$

En la figura 8(b) se muestra que, cuando los voltajes de entrada son negativos, el diodo D_N conduce. La corriente de entrada I se distribuye como se indica, de manera tal que el amplificador operacional B funciona como inversor.

Por lo tanto, el voltaje de salida V_o es positivo para las polaridades de E_i de entrada y V_o es igual al valor absoluto de E_i .



(a) Niveles de voltaje para entradas positivas: $V_o = +E_i$ para todos los valores positivos de E_i .



(b) Niveles de voltaje para entradas negativas: $V_o = -(-E_i) = |E_i|$.

Figura 9.

Rectificador de onda completa de precisión con alta impedancia de entrada.

$$R = 10 \text{ k}\Omega, \quad 2R = 20 \text{ k}\Omega$$

Las formas de onda de la figura 8(c) muestran que la polaridad de V_o siempre es positiva e igual al valor absoluto del voltaje de entrada. Para obtener salidas negativas correspondientes a las dos polaridades de E_i basta con invertir los diodos.

Rectificador de precisión de onda completa de alta impedancia. El segundo tipo de rectificador de precisión se muestra en la figura 9. La señal de entrada se conecta a las entradas del amplificador operacional no inversor para obtener así una impedancia de entrada alta. En la figura 9(a) se muestra lo que sucede cuando las entradas son positivas. E_i y R_i definen la corriente que pasa por el diodo D_p . Las entradas (-) de ambos amplificadores operacionales tienen un potencial igual a E_i por lo que no pasa ninguna corriente por R_2 , R_3 y R_4 . Por lo tanto para todo voltaje de entrada positivo, $V_o = E_i$.

En la figura 9(b), cuando E_i se vuelve negativo, E_i y R_1 definen la corriente que pasa por R_1 y por R_2 a fin de activar el diodo D_N . Dado que $R_1 = R_2$, el ánodo de D_N asume el valor $2 E_i$ ó $2 (-E_i) = -4 V$. La entrada (-) del amplificador operacional B tiene el valor $-E_i$. La caída de voltaje por R_3 es $2E_i - E_i$ o $(-4 V)$. La entrada (-) del amplificador operacional B tiene el valor $-E_i$. La caída de voltaje por R_3 es $2E_i - E_i$ o $(-4 V) - (-2) = -2 V$. Esta caída de voltaje y R_3 determinan la corriente I_3 que pasa a través de R_3 así como por R_4 , la cual es igual a la corriente de entrada I . Por lo tanto, V_o es positivo cuando E_i es negativo. De esta forma, V_o siempre es positivo, independientemente de la polaridad de E_i , por lo que $V_o = |E_i|$.

Las formas de onda de este circuito se muestran en la figura 8 (c). Observe que el valor máximo de E_i está limitado por el voltaje de saturación negativo de los amplificadores operacionales.

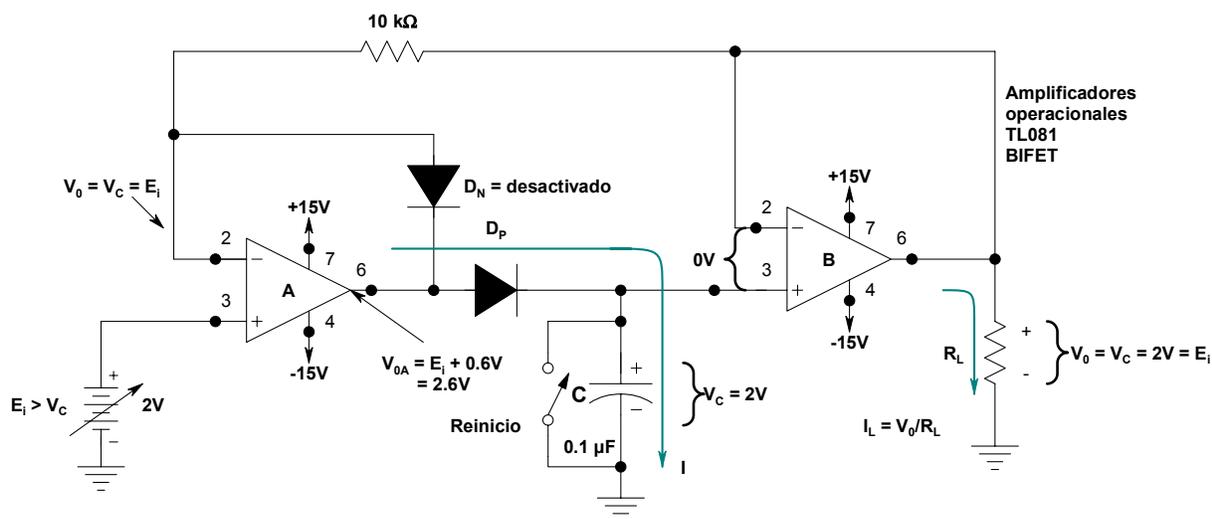
4. DETECTORES DE PICO

Además de servir para rectificar de manera precisa una señal, diodos y amplificadores operacionales se conectan para construir circuitos detectores de pico. Este tipo de circuito sigue los picos de voltaje de una señal y almacena en un capacitor el valor máximo que se haya alcanzado (durante un tiempo casi indefinido). Cuando llega una señal pico mayor, se almacena este nuevo valor. El voltaje de pico más elevado se almacena hasta que se produce la descarga del capacitor por medio de un interruptor mecánico o electrónico. A este circuito detector de pico también se le conoce como circuito *seguidor y retenedor* o *seguidor de pico*. Veremos también que al invertir dos diodos en este circuito se obtiene en vez de un seguidor de pico, un *seguidor de valle*.

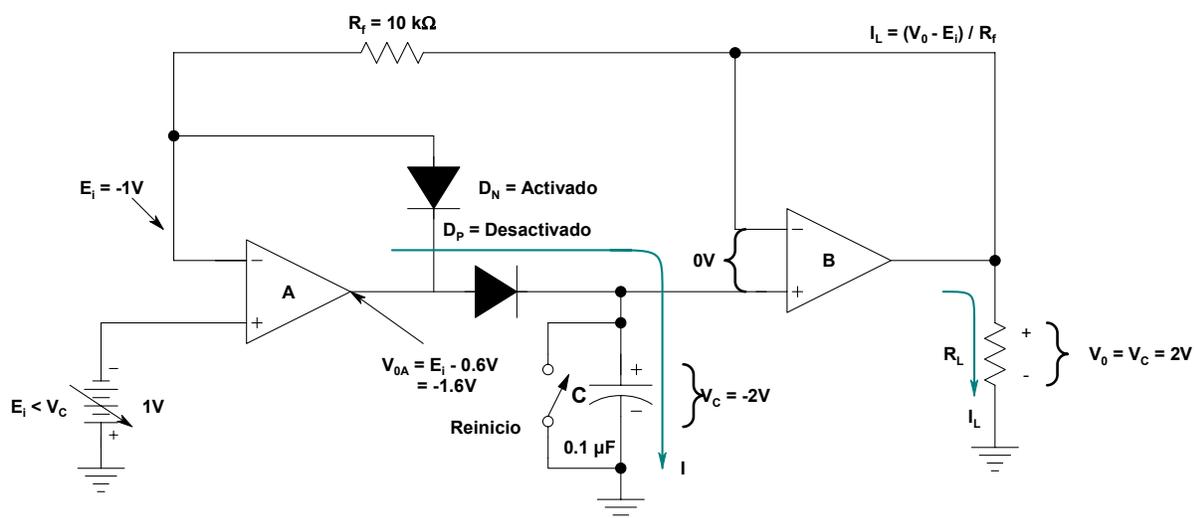
4.1. Seguidor y retenedor de pico positivo.

En la figura 10 se muestra el circuito de un seguidor y retenedor de pico. Consta de dos amplificadores operacionales, dos diodos, una resistencia, un capacitor de retención y un interruptor de reinicio. El amplificador operacional A es un rectificador de media onda de precisión, que carga a C sólo cuando el voltaje de entrada, E_i , excede al voltaje del capacitor, V_c . La alta impedancia de entrada del seguidor no permite que el capacitor se descargue de manera apreciable.

Para analizar el funcionamiento del circuito empezaremos con la figura 10(a). Cuando E_i excede a V_c , se polariza directamente el diodo D_p para cargar al capacitor de retención C. Mientras E_i sea mayor que V_c , el valor de la carga de C se aproxima a E_i . Por lo tanto, V_c sigue a E_i , en tanto E_i sea mayor que V_c . Cuando E_i desciende por debajo de V_c , el diodo D_N se comporta como se muestra en la figura 10(b).



(a) Cuando E_i excede a V_c , C se carga hacia el valor de E_i a través de D_p .



(b) Cuando E_i es menor que V_c , C mantiene voltaje al valor previo de E_i más alto.

Figura 10. Circuito seguidor de picos positivos y retenedor o detector de pico. Los amplificadores operacionales utilizados son del tipo BiFET (también se puede utilizar el OP-77 para la mayoría de las aplicaciones).

Se desactiva el diodo D_p y desconecta a C de la salida del amplificador operacional A. El diodo D_p debe ser del tipo de fuga baja, pues de lo contrario el voltaje del capacitor se descargará (caída). Para reducir al mínimo la caída, es necesario que el amplificador operacional B requiera corrientes de polarización pequeñas (véase el capítulo 9). Por ello, es necesario que el amplificador operacional B sea del tipo Metal-óxido-Semiconductor de óxido metálico (MOS) o un amplificador operacional del tipo de efecto de campo bipolar (BiFET).

En la figura 11 se muestra un ejemplo de las formas de onda de voltaje de un seguidor y retenedor de pico positivo. Para reiniciar el voltaje del capacitor de retención a cero hay que conectar una trayectoria de descarga con una resistencia de 2 kΩ.

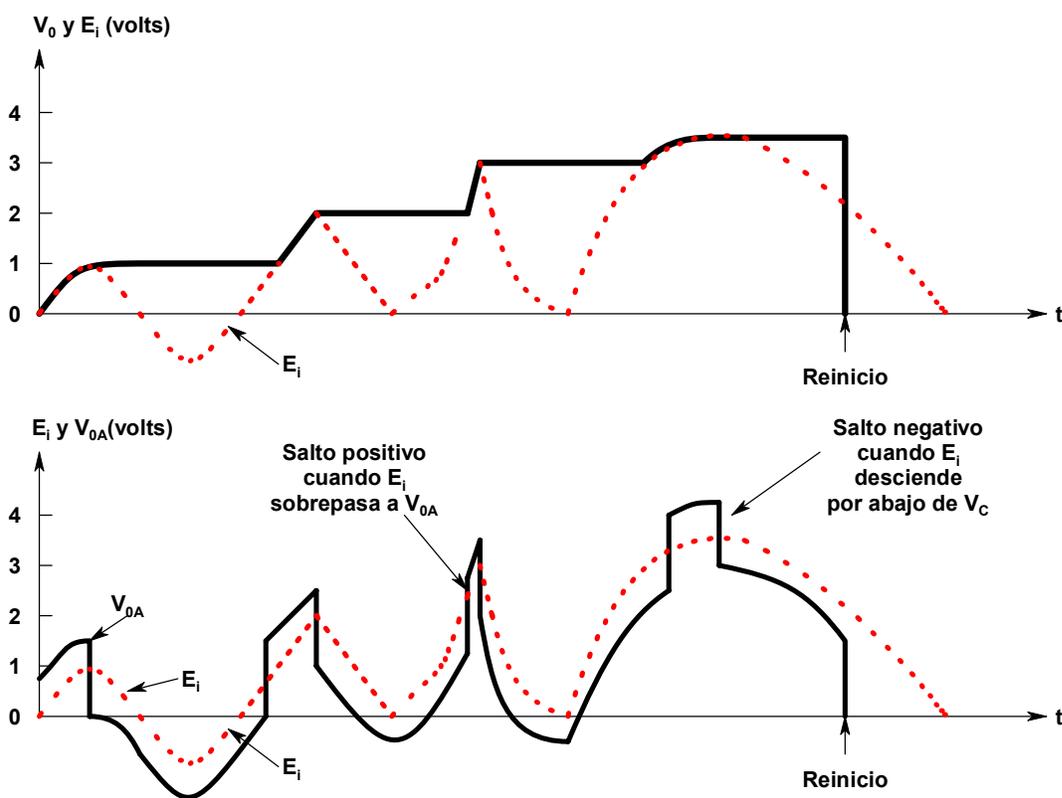


Figura 11.

Formas de las ondas correspondientes al detector positivo de la figura 10(a).

4.2. Seguidor y retenedor de pico negativo

Cuando se desea retener el voltaje más bajo o más negativo de una señal, se invierten los dos diodos de la figura 10. En el caso de señales de entrada bipolares o negativas, V_o almacenará el voltaje que tenga el valor más negativo. Si se desea monitorear un voltaje positivo y captar cualquier transitorio negativo de corta duración, basta con conectar V_c al voltaje positivo que se va a monitorear; de esta manera se carga C con un voltaje positivo igual. Por otra parte, cuando el voltaje monitoreado desciende y se recupera, V_c imitará la caída y guardará el valor más bajo.

5. CONVERTIDOR DE CA A CD

5.1. Conversión de CA a CD o circuito MAV

En esta sección se mostrará cómo diseñar y construir un circuito de amplificador operacional por medio del cual se calcula el valor promedio de un voltaje de ca rectificado. A este tipo de circuito se le denomina convertidor de ca a cd. Dado que al circuito rectificador de onda completa se conoce también como circuito de valor absoluto y dado que al valor promedio se le llama también valor medio, al convertidor de ca a cd también se le denomina circuito de *valor medio absoluto* (*mean absolute value, MAV*).

Para apreciar la utilidad del circuito MAV, observe la figura 12. En ella se muestra una onda senoidal, una triangular y una cuadrada, las cuales tienen el mismo valor máximo (pico). Por ello, mediante un detector de pico no sería posible diferenciarlas. Los semiciclos positivo y negativo son iguales en todas las ondas, por lo tanto, el valor promedio de todas estas señales es cero, y en consecuencia con un circuito o dispositivo promediador, como sería un

voltmetro de cd, no sería posible ver la diferencia entre ellas. Sin embargo, el MAV de cada voltaje si es diferente (véase la figura 12).

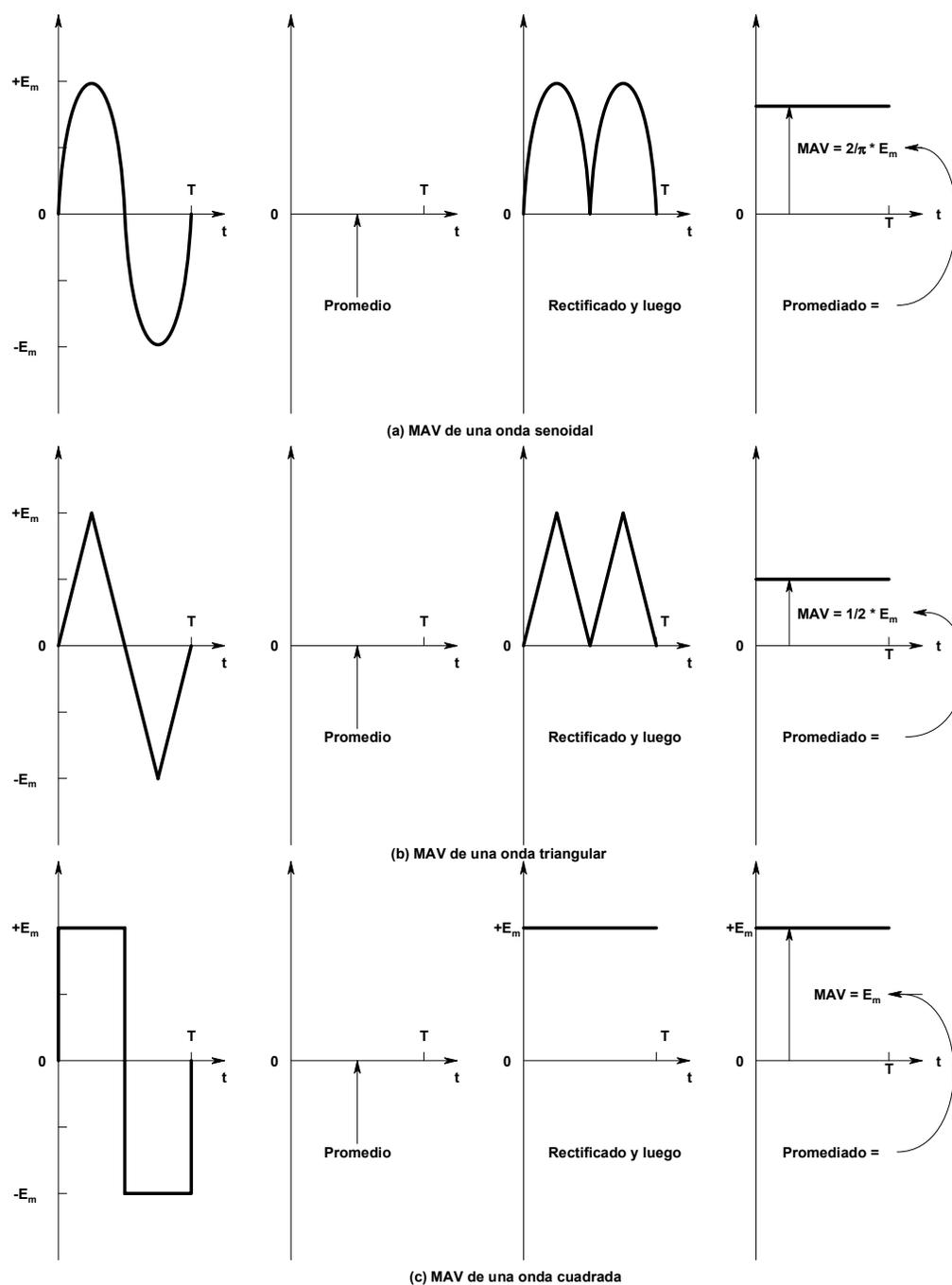
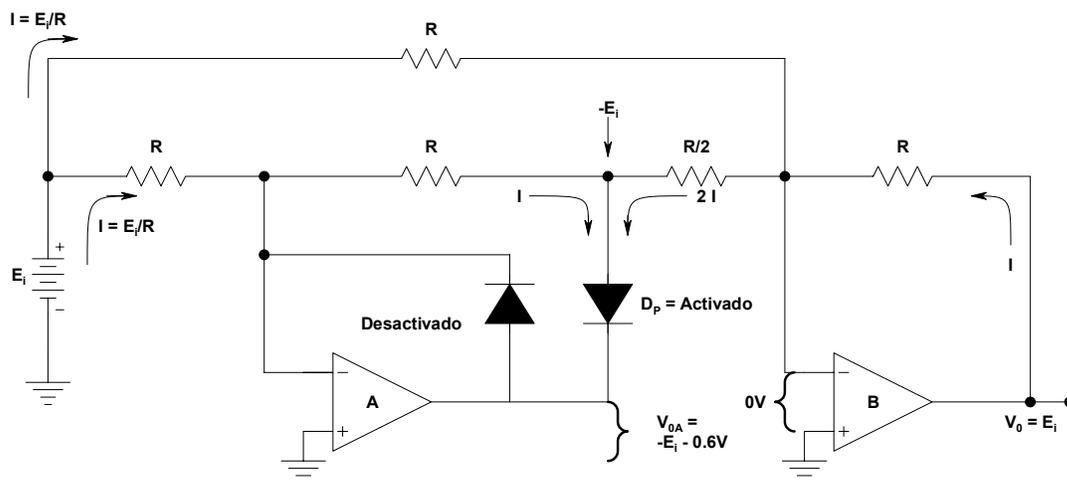


Figura 12. Valor absoluto medio de ondas senoidales, triangulares y cuadradas alternantes.

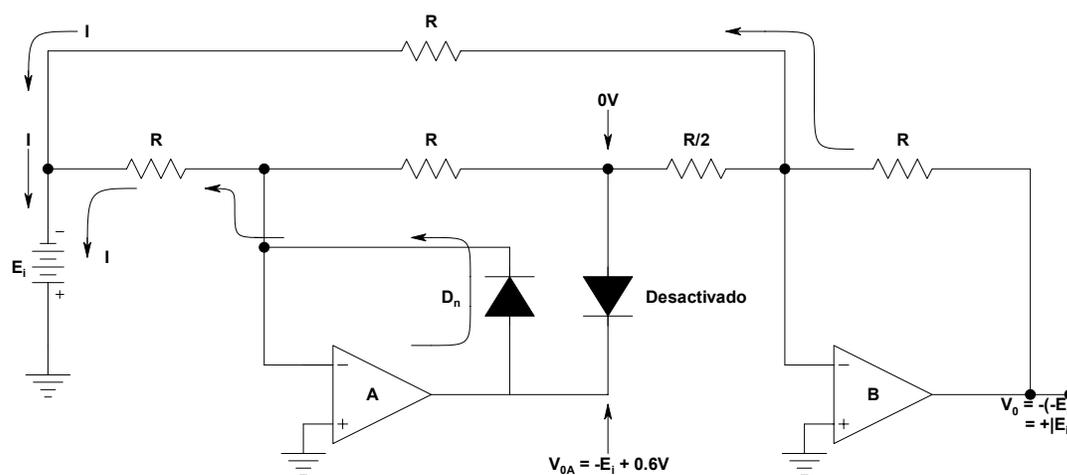
El voltaje MAV de una onda de voltaje es aproximadamente igual a su valor rms. Por ello, en vez de utilizar un costoso circuito para cálculo del rms, se emplea un económico circuito MAV.

5.2. Rectificador de precisión con entradas sumadoras.

Para construir un convertidor de ca a cd empezaremos por el rectificador de precisión o amplificador de valor absoluto de la figura 13. Para las entradas positivas de la figura 13(a) el amplificador operacional A invierte E_i . El amplificador operacional B suma la salida de A y E_i para dar una salida de circuito $V_o = E_i$. En el caso de las entradas negativas, como se aprecia en la figura 13(b), el amplificador operacional B invierte $-E_i$ y la salida V_o del circuito es $+E_i$. Por lo tanto, la salida del circuito V_o es positiva e igual al valor rectificado o absoluto de la entrada.



(a) Durante las entradas positivas, el amplificador operacional A invierte E_i , como el amplificador operacional B es un sumador inversor, $V_o = E_i$.



(b) Durante las entradas negativas, se rectifica la entrada de A al valor de 0V; el amplificador operacional B invierte E_i , por lo que $V_o = +E_i$.

Figura 13. Este amplificador de valor absoluto tiene ambos nodos de suma al potencial de tierra para una u otra polaridad del voltaje de entrada.

$$R = 20\text{k}\Omega$$

5.3. Convertidor de ca a cd

Al circuito del valor absoluto de la figura 13 se le añade un capacitor de baja fuga y con un alto valor ($10\ \mu\text{F}$ de tantalio). El circuito que así se obtiene es el del amplificador MAV. El capacitor C se encarga de promediar la salida rectificadora del amplificador operacional B. Transcurren aproximadamente de 50 a 500 ciclos de voltaje de entrada antes de que el voltaje del capacitor se estabilice y sea igual al valor de su lectura final. Si se aplican al convertidor de ca a cd las formas de onda de la figura 12, su salida será el MAV de las señales de entrada.

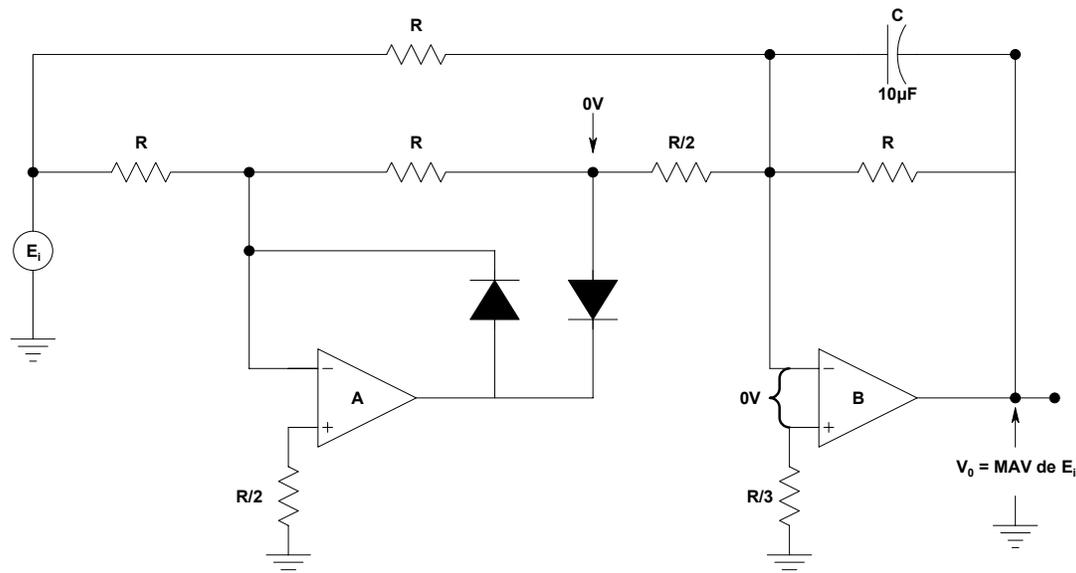


Figura 14. Para construir este convertidor de ca a cd, o amplificador de valor medio absoluto añada un capacitor al amplificador de valor absoluto de la figura 13.

6. CIRCUITOS DE ZONA MUERTA

6.1. Introducción

Mediante los circuitos comparadores es posible saber si una señal se encuentra por abajo o por arriba de un voltaje de referencia determinado. En contraste con el comparador, el circuito de zona muerta permite saber en cuánto se encuentra la señal por debajo o por arriba del voltaje de referencia.

6.2. Circuito de zona muerta con salida negativa

Para empezar a analizar el circuito de zona muerta, observaremos el circuito de la figura 15. Por medio de una fuente regulada de voltaje $+V$ adecuada y una resistencia mR se fija el voltaje de referencia V_{ref} . Este se calcula a partir de la ecuación $V_{ref} = +V/m$. Como se mostrará, el valor negativo de $V_{ref} - V_{ref}$, es el que define la zona muerta. En la figura 15(a), la corriente está definida por $+V$ y por la resistencia mR de acuerdo con la expresión: $I = V/mR$.

El diodo D_N conduce siempre que los valores de E_i sean positivos, y fija V_{OA} y V_{OB} a un valor 0 V . Por lo tanto, se impide así que todas las entradas positivas afecten la salida.

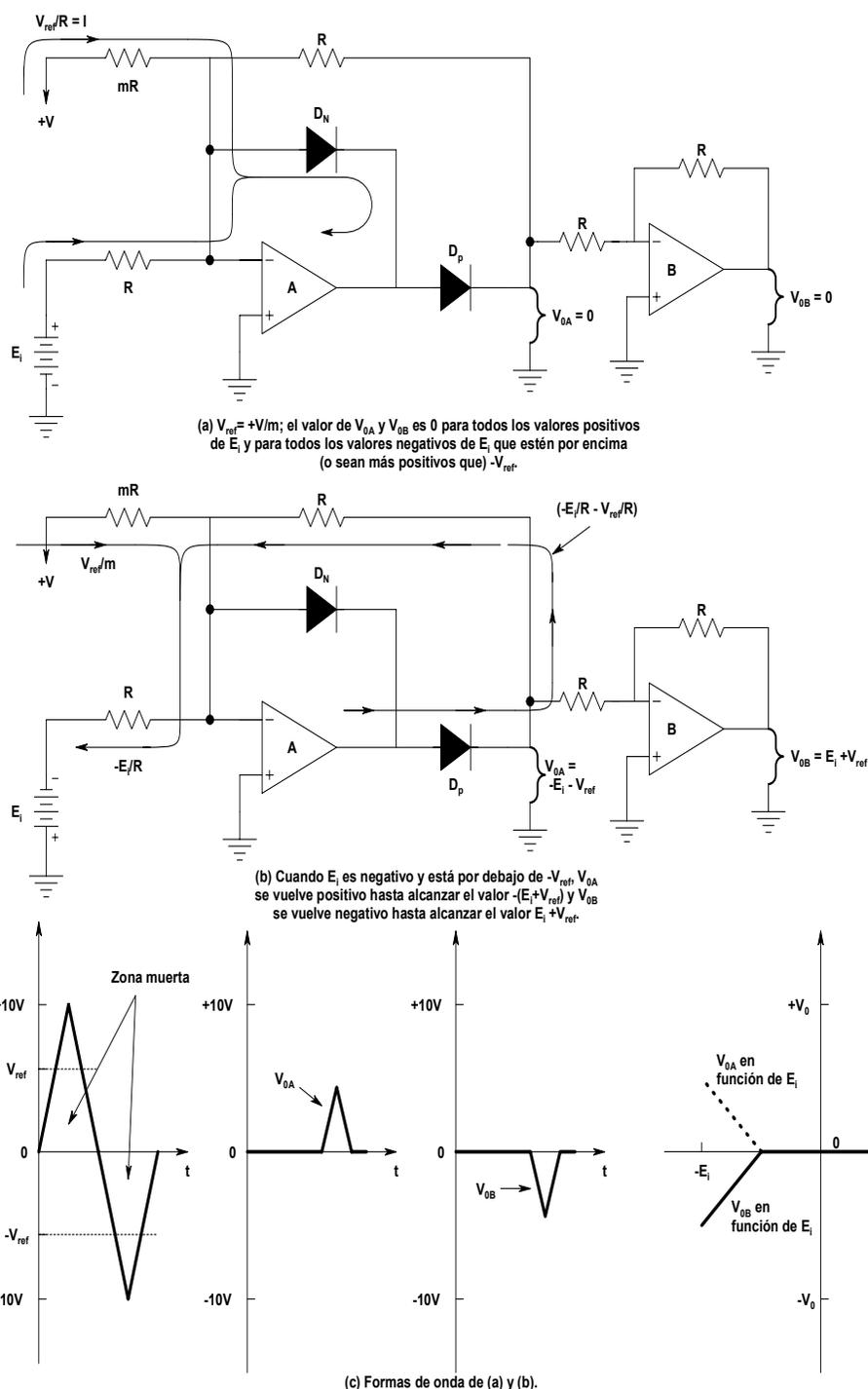


Figura 15. La salida V_{0B} del circuito de zona muerta elimina todas las porciones de la señal que estén por encima de $-V_{ref}$ cuando $V_{ref} = +V/m$.

Para obtener una salida en V_{OA} , E_i debe ser negativo, como se muestra en la figura 15(b). El diodo D_p conduce siempre que la corriente de la malla E_i/R a través de E_i exceda el valor de la corriente de malla V/mR a través de la resistencia mR .

El valor de E_i necesario para activar D_p en la figura 15(b) es igual a $-V_{ref}$. A esta conclusión se llega igualando las ecuaciones:

$$-\frac{E_i}{R} = \frac{+V}{mR} = -V_{ref}$$

y resolviendo para E_i :

$$E_i = -\frac{+V}{m} = -V_{ref} \quad (a)$$

en donde

$$V_{ref} = \frac{+V}{m} \quad (b)$$

Es decir, todos los valores de E_i mayores que $-V_{ref}$ quedan en una zona muerta en la que no serán transmitidos [véase la figura 15(c)]. El valor de las salidas V_{OA} y V_{OB} será cero.

Cuando E_i es inferior a V_{ref} , se añaden E_i y V_{ref} y su suma se invierte en la salida V_{OA} . El amplificador operacional B vuelve a invertir V_{OA} . Por lo tanto, V_{OB} sólo tiene una salida cuando E_i es menor que V_{ref} . V_{OB} permite saber por cuántos volts E_i es menor que V_{ref} .

El funcionamiento de este circuito se resume en las formas de onda de la figura 15(c) y se ilustra mediante un ejemplo.

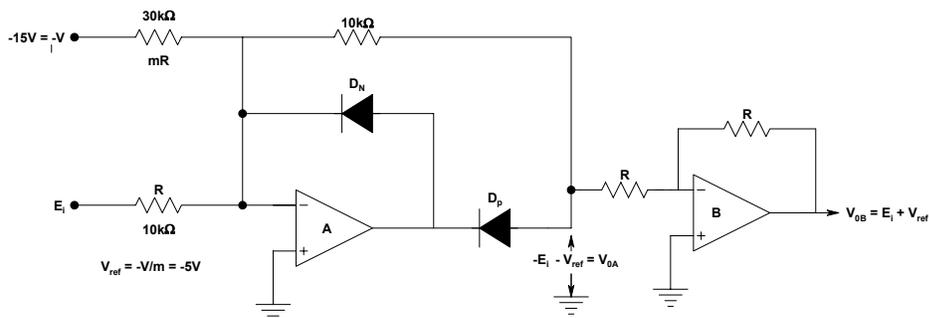
Ejemplo:

En el circuito de la figura 15, $+V = +15\text{ V}$, $rm = 30\text{ k}\Omega$ y $R = 10\text{ k}\Omega$, de manera que $m = 3$. Calcular: (a) V_{ref} ; (b) V_{OA} cuando $E_i = -10\text{ V}$.

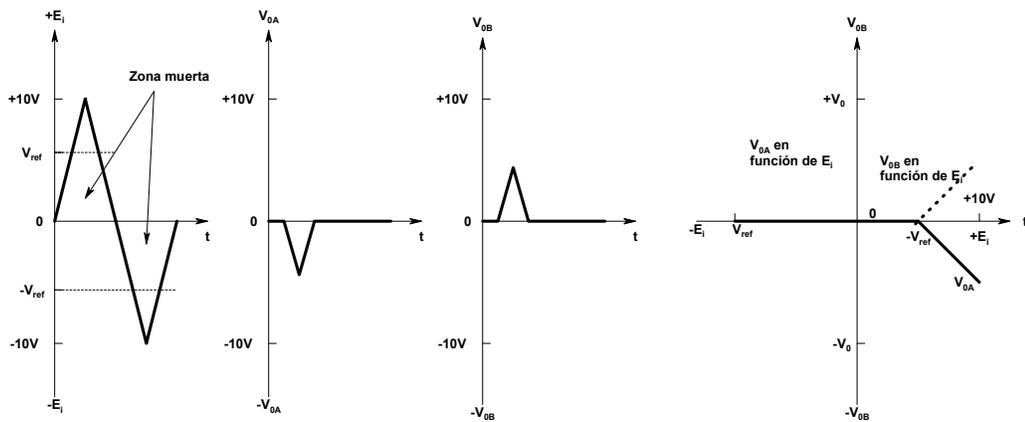
Solución: (a) Con base en la ecuación , $V_{ref} = +15\text{ V}/3$, (b) Con base en la ecuación , V_{OA} y V_{OB} serán iguales a cero cuando los valores de E_i sean mayores que $-V_{ref} = -5\text{ V}$. Por tanto, $V_{OA} = -E_i - V_{ref} = -(-10\text{ V}) = +5\text{ V}$. (c) El amplificador operacional B invierte la salida V_{OA} de manera que $V_{OB} = -5\text{ V}$. Así, la salida de V_{OB} permitirá saber por cuánto E_i rebasa a $-V_{ref}$. Todas las señales de entrada que estén por arriba de $-V_{ref}$ caen dentro de una zona muerta y se eliminan de la salida.

6.3. Circuito de zona muerta con salida positiva

Si se invierten los diodos de la figura 15, lo que se obtiene es un circuito de zona muerta con salida positiva, como se aprecia en la figura 16. Para calcular el voltaje de referencia se utiliza la ecuación b: $V_{ref} = -15\text{ V}/3 = -5\text{ V}$. Siempre que E_i rebasa el valor de $-V_{ref} = -(-5\text{ V}) = +5\text{ V}$, la salida V_{OB} permite saber por cuánto E_i excede el valor $-V_{ref}$. Existe una zona muerta cuando hay valores de E_i inferiores a $-V_{ref}$.



(a) La corriente fluye a través de D_p sólo cuando E_i está por encima de $-V_{ref}$ o $+5V$



(b) Formas de onda del circuito de zona muerta, salida positiva.

Figura 16. Circuito de zona muerta, salida positiva.

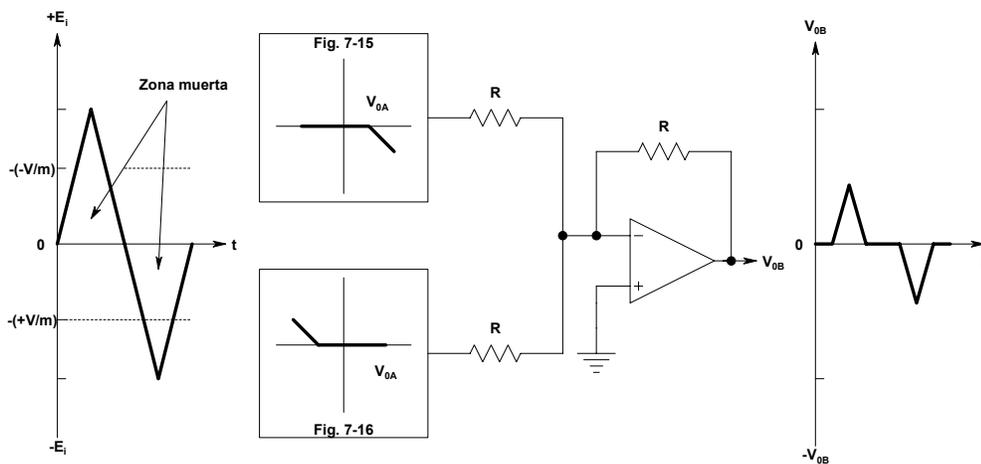
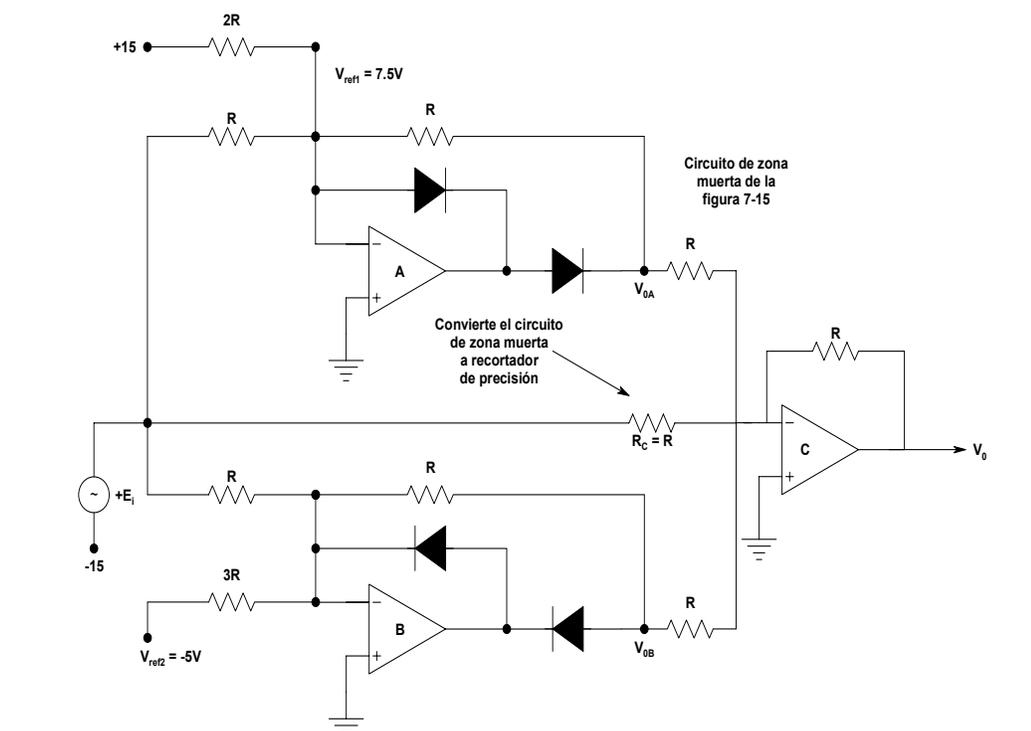
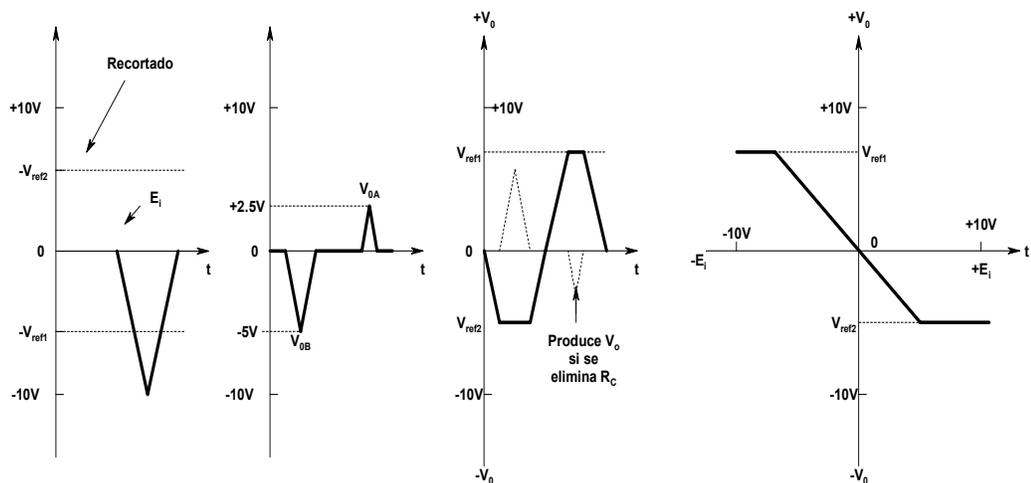


Figura 17. Las salidas VOA de las figuras 15 y 16 se combinan mediante un sumador inversor para obtener así el circuito de zona muerta, con salida bipolar.



(a) Añadiendo una resistencia R_c al circuito de zona muerta de la figura 7-17 se obtiene un recortador de precisión.



(b) Formas de onda del Recortador de precisión.

Figura 18. Para construir un recortador de precisión se combina un circuito de zona muerta bipolar y una resistencia R_c .

6.4. Circuito de zona muerta y salida bipolar.

En las figuras 17 y 18 se muestra y explica cómo combinar los circuitos de zona muerta con salida positiva y negativa. Las salidas V_{OA} de las figuras 15 y 16 se conectan a un sumador inversor. La salida del sumador V_{OB} permite saber en cuánto E_i excede a un voltaje de referencia positivo y qué tanto de E_i está por debajo de un voltaje de referencia negativo.

7. RECORTADOR DE PRECISIÓN

Mediante un circuito recortador o limitador de amplitud se recortan todas las señales cuyo valor rebase un voltaje de referencia positivo, así como las señales cuyo valor exceda a un voltaje de referencia negativo. Estos voltajes de referencia pueden ser simétricos o asimétricos respecto de cero. Para construir un circuito recortador de precisión se conecta una resistencia, R_C con un circuito de zona muerta y salida bipolar, como se aprecia en la figura 18. Además se conectan las salidas de los amplificadores operacionales A y B a la entrada del sumador inversor. La señal de entrada E_i se conecta a una tercera entrada del sumador inversor, por medio de la resistencia R_C . Si se elimina, el circuito funcionará como circuito de zona muerta. Sin embargo, si R_C está presente, se resta el voltaje de entrada, E_i , a la salida del circuito de zona muerta y se obtiene así un recortador inversor de precisión.

El funcionamiento del circuito se resume mediante las formas de onda de la figura 18(b). Se invierten las salidas V_{OA} y V_{OB} y se añaden a $-E_i$. La gráfica de V_o en función del tiempo muestra con líneas continuas cómo resulta la salida recortada. Las líneas de trazo muestran el comportamiento del circuito como si éste fuera de zona muerta cuando R_C se elimina.

8. CONVERTIDOR DE ONDA TRIANGULAR A ONDA SENOIDAL

Es más difícil construir osciladores de onda senoidal de frecuencia variable que generadores de onda triangular de frecuencia variable. En el circuito de la figura 19 se convierte la salida de un generador de onda triangular a una onda senoidal cuyo ajuste se puede hacer con menos del 5% de distorsión. El convertidor de onda triangular a senoidal es un amplificador cuya ganancia varía inversamente con la amplitud del voltaje de salida.

R_1 y R_3 definen la pendiente de V_o a bajas amplitudes cercanas al cruce por cero. Conforme V_o va aumentando, el voltaje a través de R_3 aumenta para empezar a polarizar directamente a D_1 y a D_3 a fin de dar salidas positivas, o a D_2 y D_4 para dar salidas negativas. Cuando estos diodos conducen “cortocircuitan” la resistencia de retroalimentación R_3 en paralelo, con lo que disminuye la ganancia. De esta manera se tiende a convertir la salida triangular aproximadamente mayor a 0.4 V en una onda senoidal. Para lograr que las crestas de la salida senoidal estén redondeadas, R_2 y los diodos D_5 y D_6 se ajustan hasta lograr que la ganancia del amplificador se aproxime a cero en los picos de V_o .

El circuito se ajusta mediante la comparación de la salida del convertidor de onda triangular/senoidal con una onda senoidal de 1 kHz en un osciloscopio de trazo doble. R_1 , R_2 , R_3 y la amplitud pico de E_i se ajustan, uno a la vez, y de esta manera se obtiene la mejor forma senoidal posible. Como los ajustes anteriores interactúan entre sí, habrá que repetirlos las veces que sea necesario. (Nota: Si bien con el circuito de la figura 19 se puede convertir una onda triangular en sonoidal, son muchas las partes que se necesita utilizar, es probable que usted necesite generar dicha forma de onda con partes que sean fáciles de obtener. Es mejor optar por comprar circuitos integrados que produzcan ondas triangulares, cuadradas y senoidales en un mismo paquete).

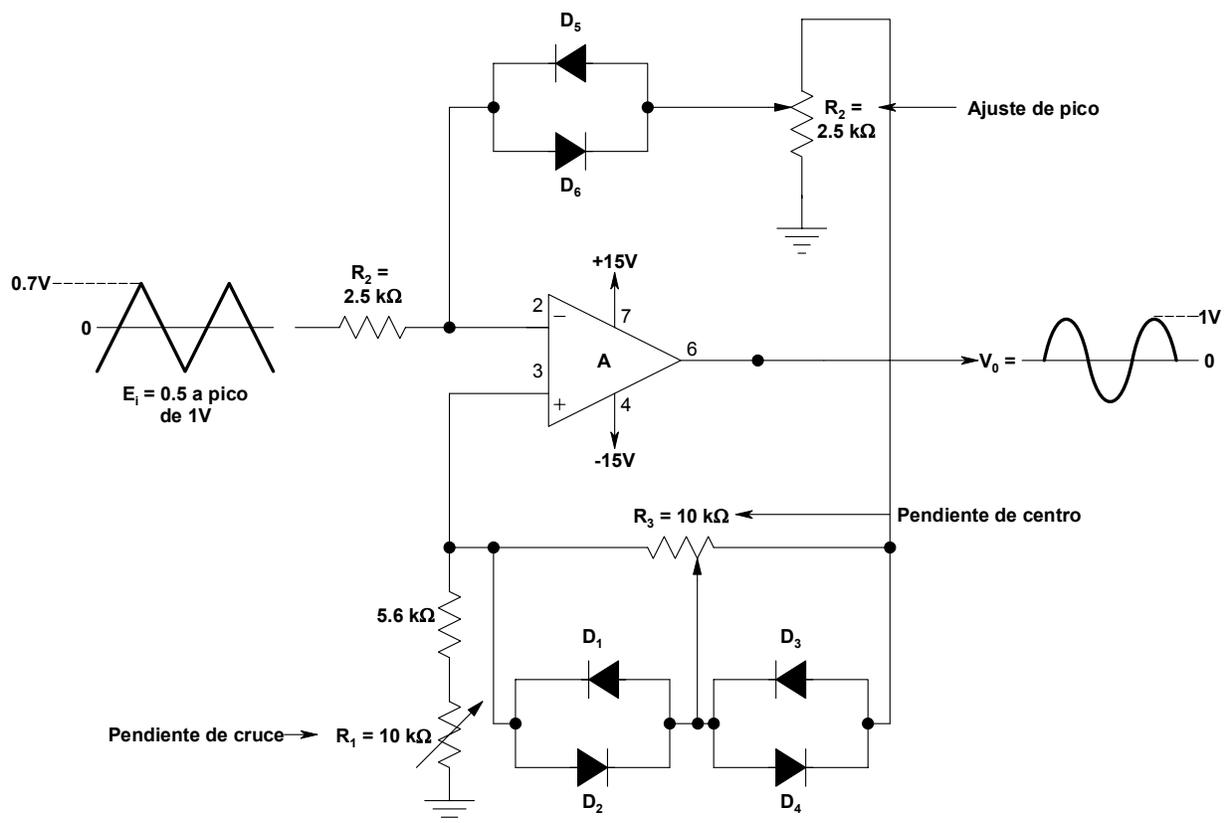


Figura 19. Convertidor de onda triangular a senoidal