

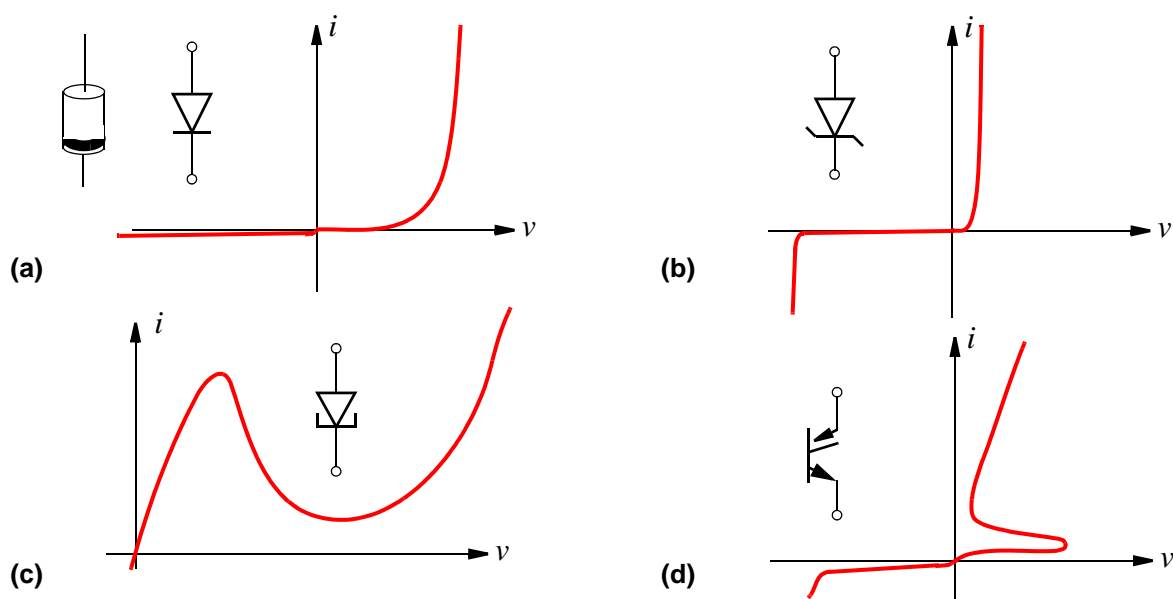
4

El Diodo de unión. Circuitos y aplicaciones

Los diodos de unión son, probablemente, los más conocidos de entre todos los dispositivos resistores no-lineales de dos terminales. En esta práctica se presentan métodos para el análisis de circuitos compuestos por la interconexión de diodos de dos terminales y fuentes independientes de tensión e intensidad. También se proponen técnicas para sintetizar resistores no-lineales en base a conectar en serie y en paralelo un conjunto de componentes básicos que pueden realizarse con diodos, fuentes independientes y resistores lineales.

1. Introducción teórica

Bajo circunstancias de entradas estáticas, o de muy baja frecuencia, los diodos pueden modelarse por dispositivos conocidos con el nombre de resistores de dos terminales. Desde un punto de vista geométrico, la relación funcional establecida por un resistor define una curva en el plano real (i, v) . A tal curva suele denominarse *curva característica*, o simplemente *característica*, del resistor en cuestión. En la Fig. 1 se muestran características para varios resistores de interés práctico. Estos son: el diodo de unión, el diodo Zener, el diodo túnel y el diodo de cuatro capas. Cada uno de estos resistores tiene su símbolo propio, que se muestra anexo a la correspondiente característica.



Hay dispositivos, por ejemplo el diodo de unión, donde la relación entre tensión e intensidad se puede obtener mediante el análisis y la formulación de las ecuaciones que rigen el movimiento de las cargas en el interior del dispositivo. Sin embargo, hay otros donde esta formulación no es posible. En tal caso hay que recurrir a un procedimiento *experimental* para obtener las curvas características. Una vez obtenidas las características en forma gráfica, siempre es posible usar técnicas matemáticas de aproximación para obtener una fórmula cuya representación sea lo más cercana posible a la curva obtenida experimentalmente.

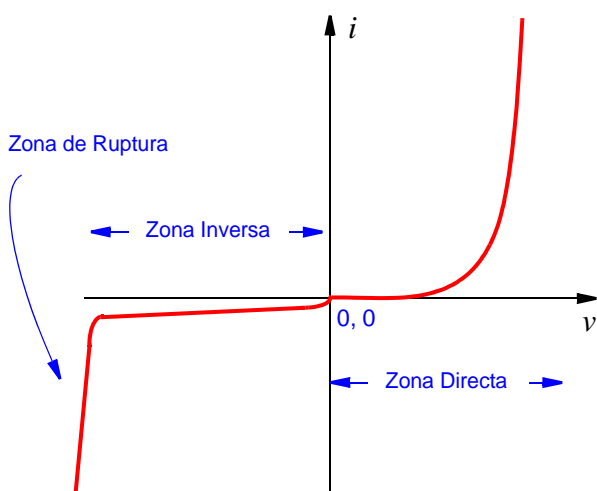


Fig. 2 Característica de un diodo de unión *pn*.

En la Fig. 2 se muestra una característica típica de un diodo de unión *pn*, donde se distinguen tres regiones:

- Zona Directa,
- Zona Inversa,
- Zona de Ruptura

Es importante advertir que en la Fig. 2 la escala del eje de tensión es muy diferente a la del eje de intensidad; y que en ambos ejes la escala del semieje correspondiente a valores positivos es muy diferente de la del correspondiente a valores negativos. Por ejemplo, las intensidades positivas pueden

tener un factor de escala 10^8 veces mayor que las negativas, y las tensiones negativas pueden tener un factor de escala 10^2 veces mayor que las positivas.

Zonas Directa e Inversa

Las zonas directa e inversa quedan descritas de manera unificada por la siguiente expresión matemática,

$$i = I_S \cdot \left(e^{\frac{v}{n \cdot U_t}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Nótese que esta expresión depende de tres parámetros, dos de los cuales son específicos del diodo mientras que el tercero es realmente una variable que cambia con la temperatura de operación, en concreto:

- I_S *intensidad de saturación*, cuyo valor depende de la estructura, la composición y la geometría del dispositivo y puede variar dentro de un rango comprendido entre 10^{-8} A y 10^{-16} A. El valor de esta intensidad de saturación es también fuertemente dependiente de la temperatura; a mayor temperatura mayor intensidad de saturación.
- n *coeficiente de emisión*, también dependiente de la estructura y la composición, y varía entre 1 y 2.

El coeficiente de emisión cambia igualmente con la intensidad. Para

distintos rangos de intensidad deberían usarse distintos valores de este coeficiente, tal como se ilustra en la Fig. 3. Ésta muestra una característica $i - v$ típica para un diodo de unión en zona directa, sobre una escala semi-logarítmica. Para intensidades medias se obtiene $n = 1$, mientras que tanto para intensidades grandes como para intensidades pequeñas se obtiene $n = 2$.

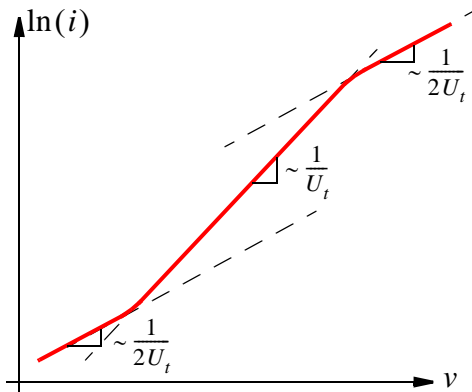


Fig. 3 Característica $i-v$ típica en zona directa.

Así pues, cuando se proporciona un valor de n único para todo el rango de intensidades, hay que entender que dicho valor se obtiene mediante ajuste experimental, y que es función del rango de intensidades que se esté considerando. Los diodos de Silicio tienen normalmente $n = 2$. En los diodos de Germanio este valor suele ser $n = 1$.

- U_t tensión térmica, dada por,

$$U_t = \frac{kT}{q} \quad (3.2)$$

donde $k = 1.38 \times 10^{-23}$ julios/kelvin es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin, y $q = 1.60 \times 10^{-19}$ culombios es la carga del electrón. A temperatura ambiente de 27°C la tensión térmica tiene un valor de 26mV .

En zona directa, para $v > 0$ y si $v > \sim 4nU_t$, la característica del diodo puede aproximarse por,

$$i \approx I_S e^{\frac{v}{nU_t}} \quad (3.3)$$

que es la expresión que se usa normalmente. En zona directa, el diodo de unión puede operar con corrientes que cubran varios órdenes de magnitud de variación. Sin embargo, la naturaleza exponencial de la relación entre intensidad y tensión determina el que esta última cubra rangos mucho más reducidos. Esto queda claramente de manifiesto al despejar v de la expresión anterior,

$$v \approx nU_t \ln\left(\frac{i}{I_S}\right) = 2.3nU_t \log\left(\frac{i}{I_S}\right) \quad (3.4)$$

Vemos pues que por cada década de variación de la intensidad, la tensión varía sólo en una cantidad igual a $2.3nU_t$. A temperatura ambiente y suponiendo $n = 1$, esto significa 58mV de variación de la tensión por cada década de

variación de la intensidad. Así, por ejemplo, si $I_S = 10^{-15} \text{ A}$ es posible hacer variar la intensidad desde 1 nA hasta 1 mA con una variación de la tensión de sólo 345 mV.

En zona inversa, para $v < 0$ y si $|v| \gg U_t$ la característica del diodo puede aproximarse por,

$$i \approx -I_S \quad (3.5)$$

una corriente mucho más pequeña que la que se obtiene en zona directa. En la práctica la corriente en zona inversa puede ser mayor que I_S debido a fenómenos no contemplados por la ecuación (3.1). En cualquier caso, la corriente en zona inversa suele estar en el rango de los nAs.

Zona de Ruptura

Dentro de la zona inversa, al aumentar mucho la caída de tensión desde el terminal negativo hasta el terminal positivo del diodo, se observa que a partir de cierto valor, llamado *tensión de ruptura* E_z , la intensidad inversa aumenta muy rápidamente con la tensión. En estas condiciones, el diodo puede llegar a destruirse a no ser que se limite de alguna manera la intensidad que circula por él y por tanto su consumo de potencia. Dentro de la región de ruptura el dispositivo equivale a una fuente de tensión,

$$v \approx -E_z \quad (3.6)$$

cuyo valor es también fuertemente dependiente de la tecnología; típicamente varias decenas de voltio. La ruptura es un comportamiento parásito que debe evitarse en las aplicaciones del diodo de unión. Sin embargo, hay dispositivos, como los diodos Zener, donde la ruptura es un proceso controlado y la tensión de ruptura toma valores en el rango de voltios.

2. Aplicaciones del Diodo

2.1. Rectificadores

Rectificador de Media Onda

Los rectificadores de media onda y de onda completa se usan para transformar una tensión de *alterna* – AC – en otra de *continua* – DC. Se usan por lo tanto en todos los circuitos electrónicos, salvo los que van alimentados por baterías. En el circuito rectificador de media onda que se muestra en la Fig. 4(a) la tensión de la entrada está fijada por la fuente; mientras que la tensión a la salida, v_o , es nula cuando no circule intensidad, o coincide con la excitación cuando el diodo conduce.

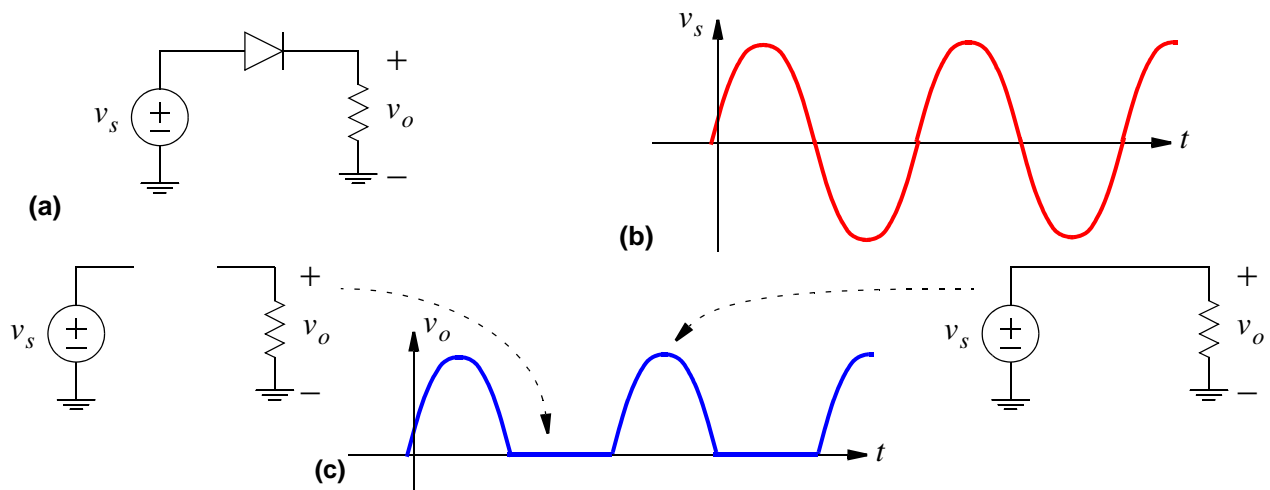


Fig. 4 Rectificador de media onda con diodo y fuente ideales.

Esto lo podemos interpretar diciendo que el circuito transforma la tensión de entrada, definida por la fuente, en una tensión de salida, la que cae en el resistor, de acuerdo con la siguiente ley,

$$v_o = \begin{cases} v_s & , v_s > 0 \\ 0 & , \text{en caso contrario} \end{cases} \equiv u_{2+}(v_s) \quad (3.7)$$

De este modo, si la tensión de entrada es la señal sinusoidal de alterna disponible en los enchufes de su casa,

$$v_s = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.8)$$

a señal de salida vendrá dada por,

$$v_o = u_{2+}[A \cdot \sin(\omega \cdot t)] = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega \cdot t) & , 2k \cdot \pi < \omega \cdot t < (2k+1) \cdot \pi \\ 0 & , (2k+1) \cdot \pi < \omega \cdot t < (2k+2) \cdot \pi \end{cases} \quad (3.9)$$

La operación del rectificador de media onda se ilustra gráficamente en la Fig. 4. Allí se muestra que la señal de salida sólo contiene valores positivos. Por tanto, al integrarla se obtendrá un valor positivo. En esto radica la base para la obtención de una tensión de *DC* a partir de la forma de onda de la Fig. 4(c).

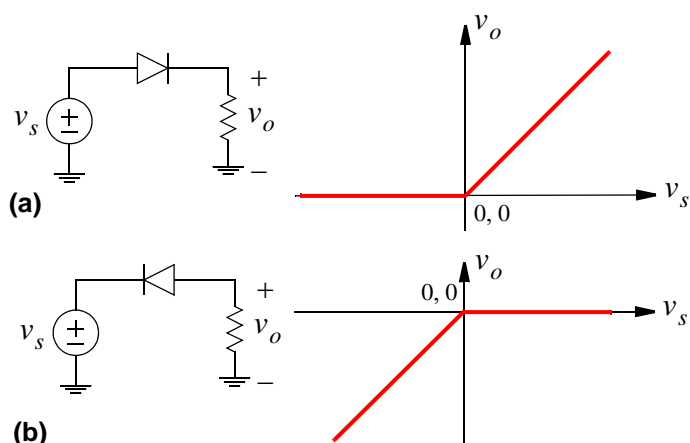
Rectificador de Onda Completa

Fig. 5 Rectificadores de media onda positivos y negativos.

La Fig. 5(a) muestra la característica tensión-de-salida frente a tensión-de-entrada para el circuito de la Fig. 4(a). Es inmediato comprobar que la característica complementaria, mostrada en la Fig. 5(b), se obtiene simplemente intercambiando los terminales del diodo; esta característica permitiría eliminar los semiciclos positivos de la señal de AC de entrada, dejando únicamente los negativos. Al integrar la señal así rectificada se obtendría, pues, un número negativo.

Cualquiera de los rectificadores de media onda desaprovechan la mitad de la señal original de AC. Esto puede evitarse usando un rectificador de onda completa, que realiza la transformación tensión-tensión mostrada en la Fig. 6(a). Al pasar una señal de AC por un rectificador de onda completa se obtiene la forma de onda mostrada en la Fig. 6(b), cuya integración da también un valor positivo pero doble del que se obtiene al integrar la forma de onda de la Fig. 4(c).

Hay distintas maneras de realizar un rectificador de onda completa usando diodos ideales. Una posibilidad es usar el circuito que se muestra en la Fig. 7(a), que contiene 4 diodos. Para comprender mejor la operación de este circuito es de interés contemplarlo como la superposición de dos rectificadores de media onda, tal como se muestra en la Fig. 7(b). Cada rama rectificadora de media onda implementa la característica tensión-tensión que se muestra en la figura. La rama de arriba deja pasar intensidades positivas – representadas por $i_+ - y$, por tanto, valores positivos de la tensión de entrada; por contra, la rama de abajo deja pasar intensidades negativas – representadas por $i_- - y$, por tanto, valores negativos de la tensión de entrada. Nótese que en estos últimos la tensión de salida se obtiene con signo cambiado respecto a la de entrada. En cada rama la resistencia correspondiente “trabaja” únicamente durante la mitad del ciclo, y los ciclos de trabajo son complementarios. Podría pensarse, pues, en que las dos ramas compartieran una única resistencia.

El obstáculo para ello es que en cada rama la tensión está referida a un terminal distinto de esta resistencia – ver Fig. 7(c). Afortunadamente, en la rama de arriba la corriente que circula hacia el terminal de referencia es sólo positiva,

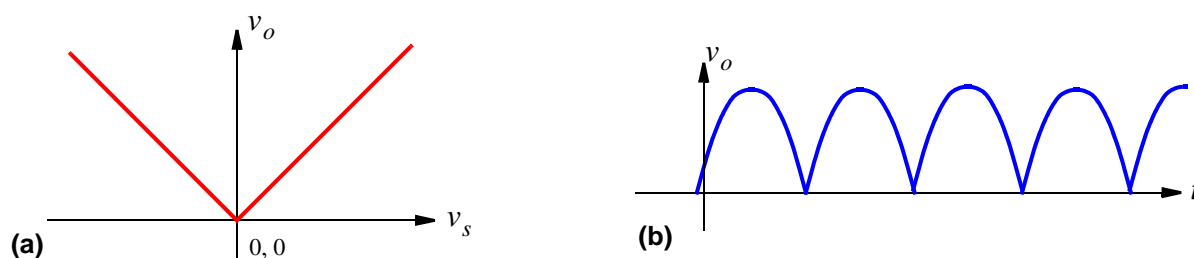
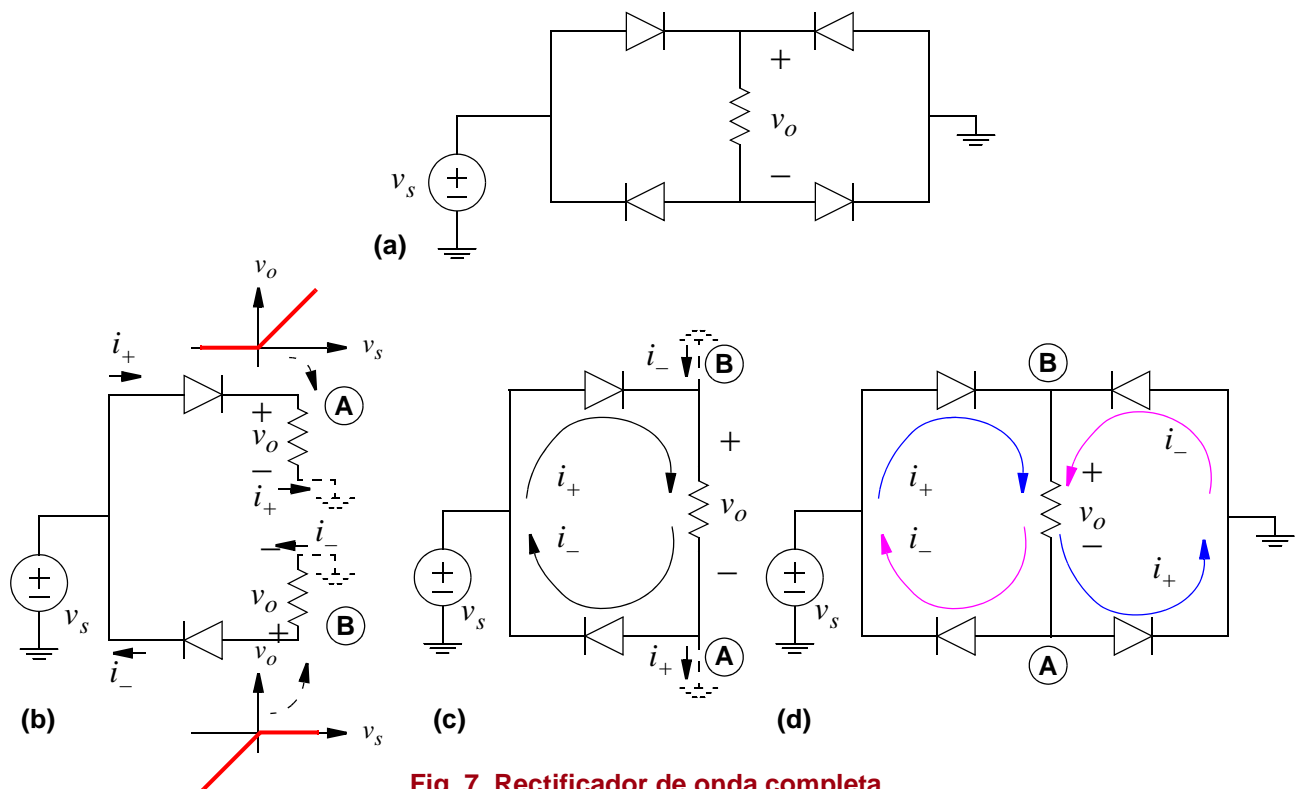


Fig. 6 Característica tensión-tensión y señal de AC en un rectificador de onda completa.



mientras que en la rama de abajo es sólo negativa. A partir de un terminal común de referencia es posible, por tanto, conmutarlo bien a la rama de arriba o a la de abajo usando diodos, tal como se muestra en la Fig. 7(d).

2.2. Limitadores de tensión

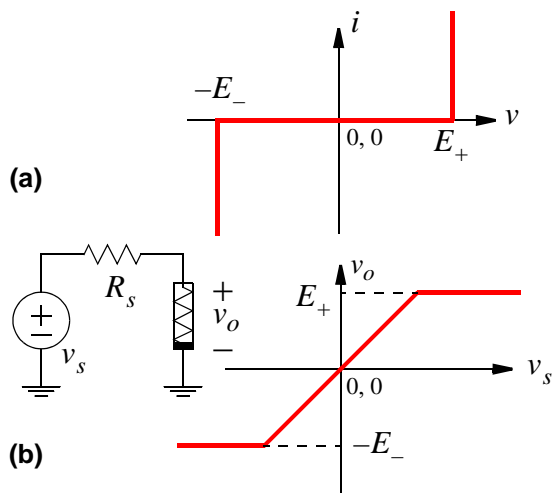


Fig. 8 (a) Característica $i-v$ para limitar en tensión; (b) Característica entrada-salida de un limitador.

Un limitador de tensión es un circuito que impide que la tensión entre dos terminales supere unas cotas prefijadas; además, para tensiones comprendidas entre dichas cotas, los valores correspondientes no deben estar influidos por el limitador. Esto puede conseguirse mediante un resistor no-lineal que actúe como un circuito abierto dentro del rango de tensiones permitidas, y como una fuente de tensión para cada uno de los valores límite. Tal característica se muestra en Fig. 8(a); y la operación de limitación de tensión se ilustra en la Fig. 8(b); cuando la tensión de entrada v_s supera los valores límite, la tensión en exceso entre la entrada y las cotas fijadas por el resistor no-lineal cae en la resistencia de fuente.

Veamos ahora cómo realizar la característica de la Fig. 9(a) con diodos ideales. Esto puede lograrse descomponiéndola en la suma, tensión a tensión, de las dos características mostradas en la Fig. 9(b). Es inmediato comprobar que la denominada i_+-v corresponde a un diodo conectado en serie con una fuente de

tensión que produce un desplazamiento de la tensión cero. Por otra parte, nótese que al girar 180° en sentido horario la característica $i_- - v$ se obtiene otra similar a la $i_+ - v$ y que puede, por tanto, implementarse con la misma estructura de circuito. Puesto que un giro de 180° equivale a cruzar los terminales de entrada, esto nos permite obtener la característica $i_- - v$. Una vez obtenidas las dos características componentes basta conectar los circuitos correspondientes en paralelo para que se sumen sus intensidades tensión a tensión, obteniéndose finalmente el circuito mostrado en la Fig. 9(c).

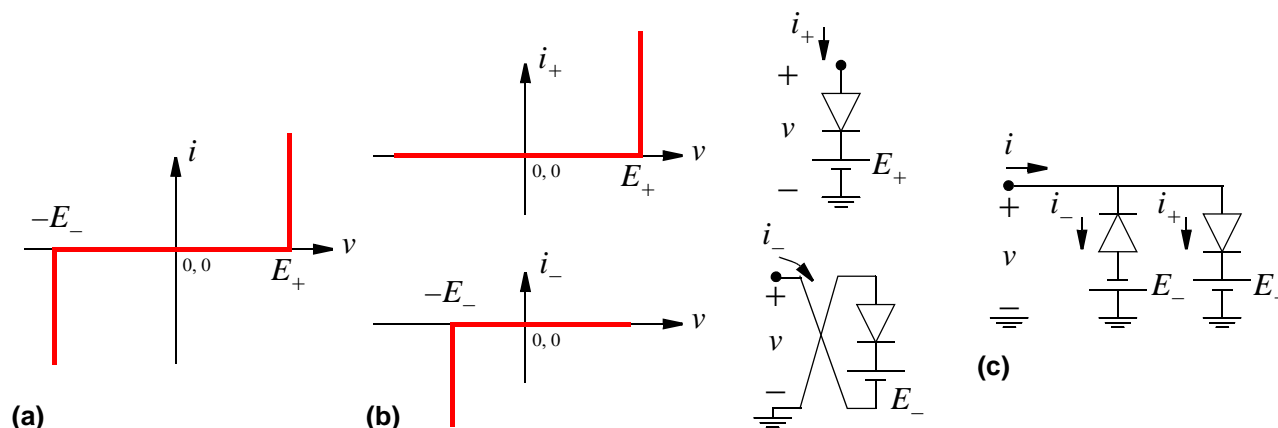


Fig. 9 Proceso de síntesis para la característica resistiva de un limitador de tensión.

2.3. Conversión AC-DC y fuentes de tensión

Añadiendo un condensador en paralelo con la resistencia al circuito de la Fig. 4 podemos obtener una señal constante a partir de una señal sinusoidal dada, es decir, una conversión AC-DC.

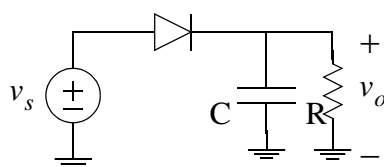


Fig. 10 Convertidor AC-DC

El circuito correspondiente se muestra en la Fig. 10. Para entender el funcionamiento de este circuito, basta comprobar que, cuando el diodo está conduciendo, $v_o = v_s - v_d$, de modo que el condensador se carga a este valor.

Si asumimos que el valor máximo de la señal de entrada es v_p , la tensión entre los extremos del condensador será aproximadamente $v_o = v_p - 0,7V$. Cuando v_s disminuye por debajo de v_p la caída de tensión entre los nudos terminales del diodo disminuye, dado que v_o se mantiene prácticamente constante debido a la acción del condensador. Entonces el diodo pasa a su zona de corte, de modo que se comporta en la práctica como un circuito abierto. Así, el condensador queda conectado únicamente a la resistencia, de modo que se descarga al pasar una intensidad a través de ésta.

Si la constante de tiempo RC es lo suficientemente grande, esta descarga será lo suficientemente lenta como para mantener la tensión de salida aproximadamente constante hasta que se produce una subida de tensión de la

señal de entrada por encima del valor que hace volver el diodo a su zona directa. La salida, entonces, seguirá a la entrada de nuevo (permaneciendo siempre a una tensión inferior en 0,7V a la de la entrada). El condensador se carga de nuevo y el proceso se repite de forma continuada. Es importante destacar que el rizado puede hacerse tan pequeño como se desee (en primera aproximación) modificando el factor RC del circuito.

3. Montaje Experimental

3.1. Material

- Diodos de unión 1N4007
- Resistencias de 1, 10, 100k Ω y 100 Ω
- 1 condensador de 1 μ F
- Generador de señales
- Fuente de continua
- Osciloscopio

3.2. Limitador de tensión

Monte el circuito que se muestra en la Fig. 11. Utilice las salidas apropiadas de la fuente de continua PROMAX para generar E_+ (tensión positiva de 5V) y E_- tensión negativa variable, que se debe fijar inicialmente a 5V. Por otro lado, conecte el generador de señales a la entrada y genere una tensión sinusoidal, de frecuencia 1kHz y amplitud 8V (amplitud 16V pico-pico). a) Visualice utilizando el osciloscopio las señales temporales de entrada y salida del circuito. b) Obtenga la característica $v_{out} - v_s$ utilizando el modo XY. Anote las tensiones a las que la salida se limita. ¿Coinciden con los valores de E_+ y E_- ? Mida los valores exactos de E_+ y E_- usando el polímetro o bien mediante el osciloscopio. (NOTA: todas estas medidas y gráficas deben ser incluidas en los espacios que se han dejado a tal efecto en la última página de esta práctica). c) Compruebe cómo variando la señal E_- cambia uno de los valores límites de salida del circuito. d) Modifique el montaje para que sea el otro límite el que varíe

Nota: Disminuya la frecuencia de la entrada si la característica presenta histéresis..

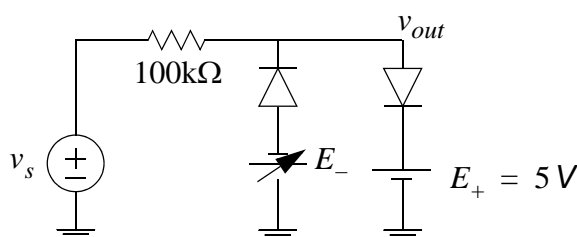


Fig. 11 Limitador de tensión controlable

3.3. Rectificador de media onda

Construya el circuito de la Fig. 7 (b) usando dos resistencias de $10\text{k}\Omega$ y una excitación sinusoidal de 1kHz de frecuencia y 10V de amplitud pico-pico

a) Observe por los dos canales del osciloscopio la señal del nudo A y la del nudo B. Ajuste la división temporal del osciloscopio para poder observar varios ciclos de la señal.

b) Usando el menú matemático del oscilador, reste ambas señales para observar un comportamiento de rectificador de onda completo.

c) Mida el valor de DC de las señales de entrada y salida en todos los casos. (Utilice el osciloscopio o el polímetro). Compare dicho valor con el valor teórico correspondiente a una señal rectificada.

3.4. Convertidor AC-DC

Construya el circuito de la Fig. 10 usando un condensador de $1\mu\text{F}$ (ANTES DE CONECTAR EL CIRCUITO A LA SEÑAL, COMPRUEBE LA POLARIDAD DEL CONDENSADOR) y una resistencia de $10\text{k}\Omega$. Utilice la misma entrada sinusoidal que en apartado anterior: una excitación sinusoidal de 1kHz de frecuencia y 10V de amplitud pico-pico.

a) Visualice la señal de salida en el osciloscopio y Mida el valor medio (o valor de DC) de la tensión de salida. Observe también el rizado de la señal durante el intervalo de descarga del condensador. ¿Cuál es el la amplitud del rizado ?. (Tenga cuidado con la medida automática del osciloscopio y aplique promediado, para que sea más exacta).

b) Cambie el valor de la amplitud de entrada y observe su influencia en el valor medio y en el rizado de la señal

c) Cambie la frecuencia de la señal de entrada y observe su influencia en el comportamiento del circuito.

c) Vuelva a las condiciones iniciales de entrada, cambie el valor de resistencia a $100\text{k}\Omega$ y observe el efecto en el rizado de la señal.

4. Referencias de Consulta

M.H.Rashid: "Circuitos *Microelectrónicos: Análisis y Diseño*". International Thomson Editores.

A. S. Sedra, K. C. Smith: "*Microelectronic Circuits*". Oxford University Press.

Práctica 3. NOMBRE y APELLIDOS: _____

5. RESULTADOS:

5.1. Limitador de tensión

Mida los valores de las Fuentes de Tensión positiva y negativa del circuito que tiene montado experimentalmente:

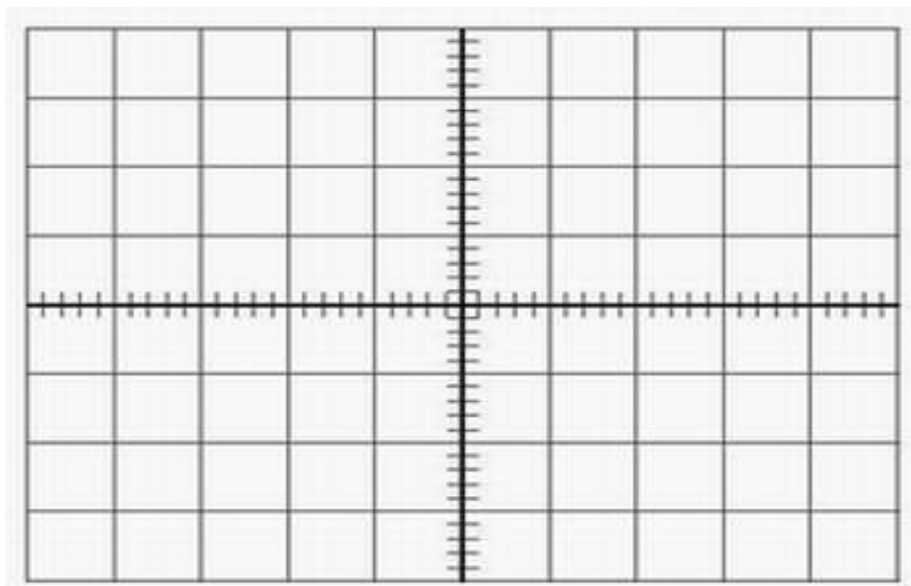
Valor de E_+ : _____ Valor de E_- : _____

Tensión a la que se limita la amplitud positiva: _____

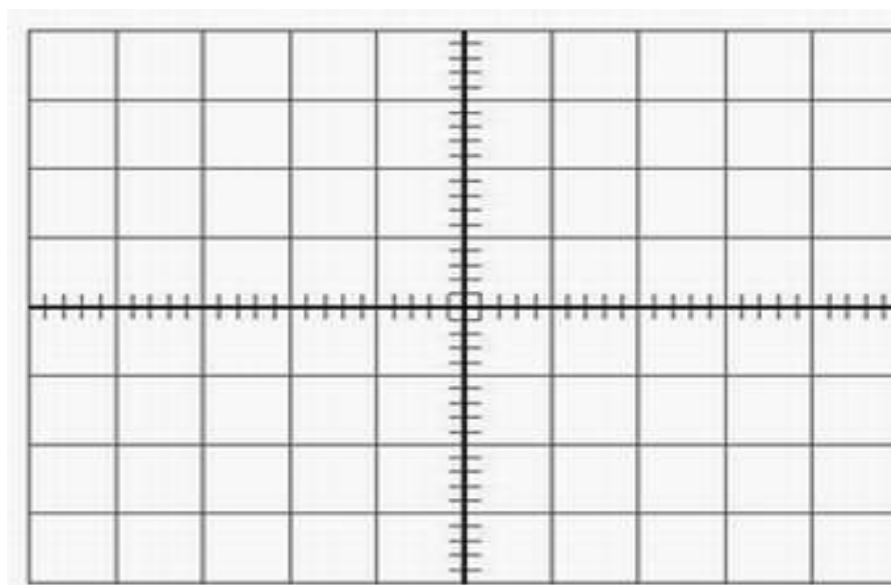
Tensión a la que se limita la amplitud negativa: _____

Dibuje las gráficas que ha obtenido en el osciloscopio. Anote las escalas, las variables medidas y los puntos más significativos de las características

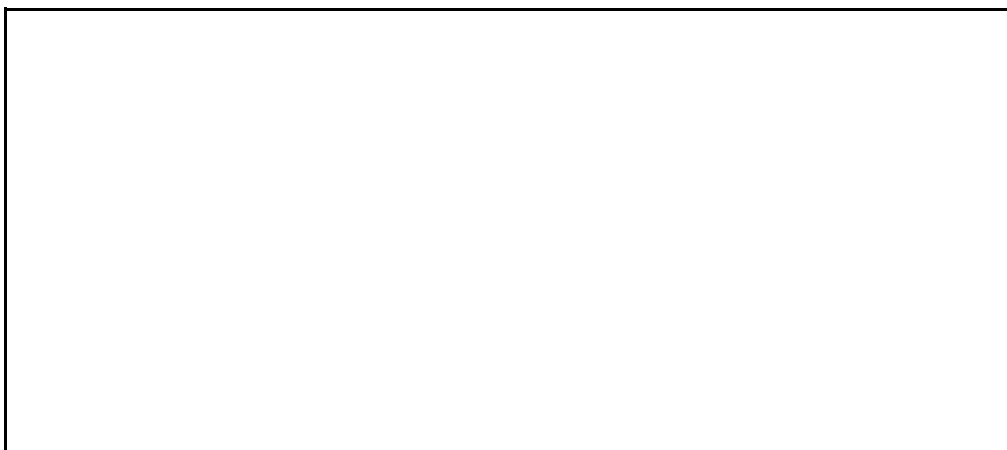
Modo temporal:



Modo XY:

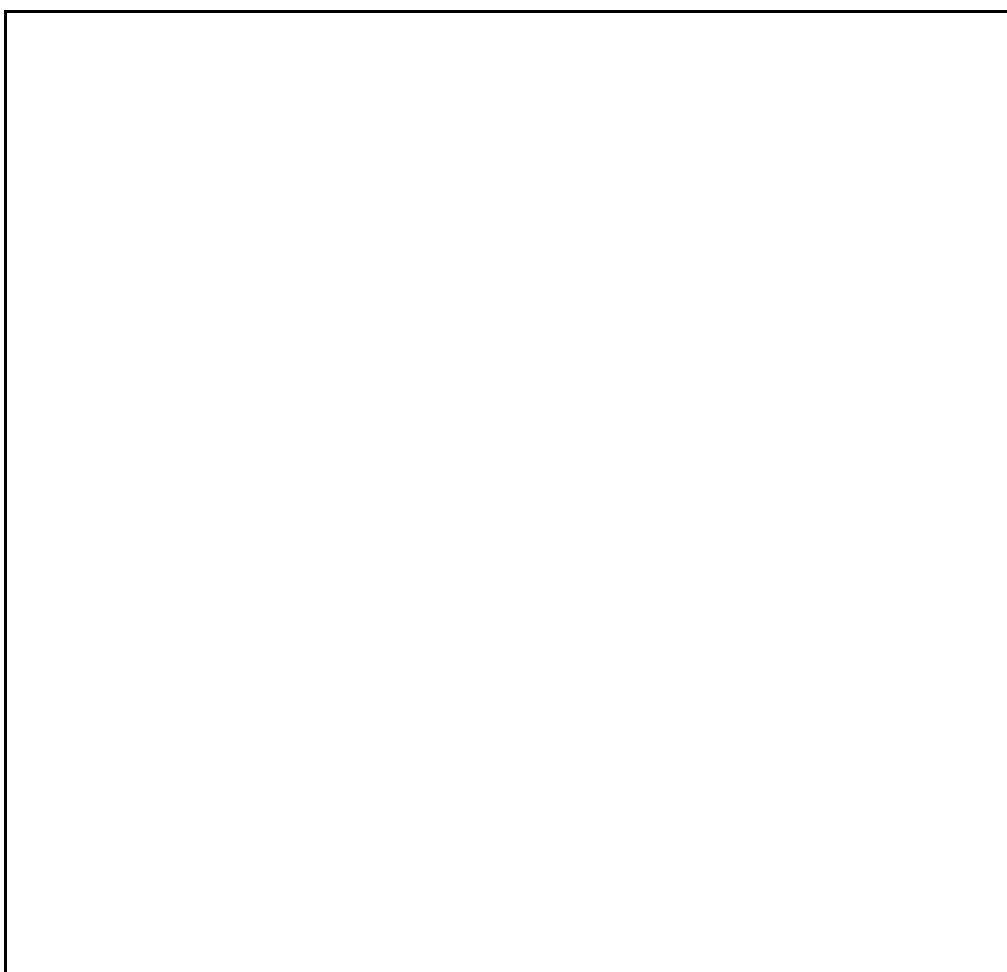


Compare los resultados experimentales con los previstos teóricamente y explique brevemente a qué son debidas las diferencias.



5.2. Rectificador de media onda

Obtenga una expresión del valor de DC para la salida de las señales rectificadas de media onda y onda completa. Compare los resultados experimentales con los que obtiene teóricamente y trate de justificar las diferencias (si necesita más espacio, puede hacer uso de una página adicional y consulte la bibliografía recomendada)..



5.3. Convertidor AC-DC

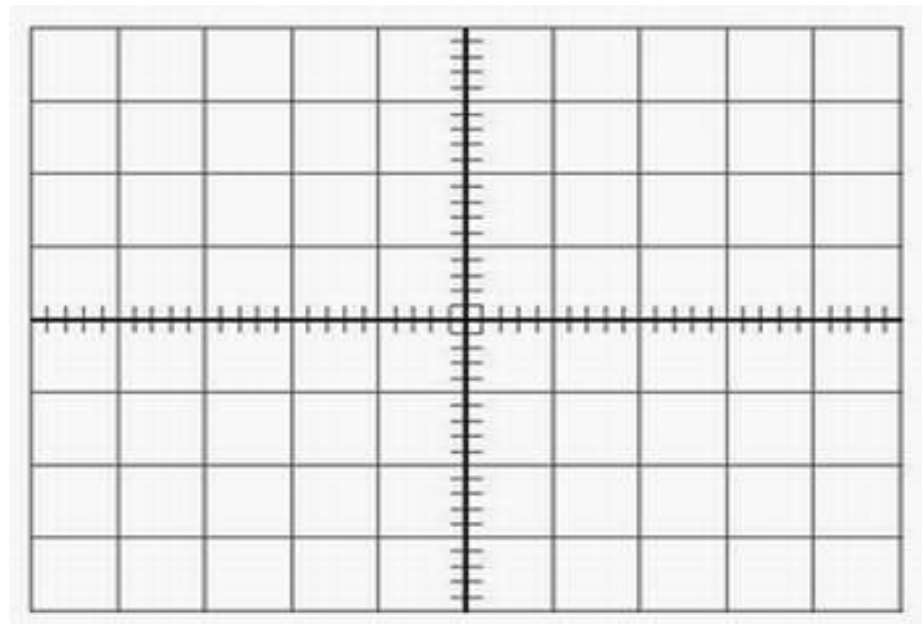
a) Para el caso del condensador de $1\mu\text{F}$ y la resistencia de $10\text{K}\Omega$. Anote:

Amplitud y frecuencia de la señal de entrada: _____

Rizado de la señal a la salida: _____

Valor DC de la tensión de salida: _____

Dibuje de forma aproximada la señal de entrada y salida que visualiza en el el osciloscopio. Anote las escalas y la referencia de tierra (0 V).



b) Repita las medidas y anote el valor de DC y rizado para otra amplitud de entrada.

Amplitud de la señal de entrada: _____

Valor DC y rizado de la señal a la salida: _____

c) Aumente la frecuencia de la señal de entrada hasta 5KHz y tome de nuevo las medidas.

Valor DC y rizado de la señal a la salida: _____

d) Por último, obtenga una expresión aproximada del rizado de la tensión de salida del circuito. Compare los resultados teóricos con los que ha obtenido experimentalmente y trate de justificar las posibles diferencias.

