

Semiconductores

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Reconocer, a nivel atómico, las características de los conductores y de los semiconductores.
- Describir la estructura de un cristal de silicio.
- Conocer los dos tipos de portadores y las clases de impurezas que los convierten en mayoritarios.
- Explicar las condiciones que se cumplen en la unión *pn* de un diodo sin polarizar, de un diodo polarizado en inversa y de un diodo polarizado en directa.
- Comprender los dos tipos de corrientes de ruptura provocados por la aplicación de una tensión inversa excesiva sobre un diodo.

VOCABULARIO

- | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| • banda de conducción | • energía térmica | • semiconductor de tipo- <i>n</i> |
| • barrera de potencial | • hueco | • semiconductor de tipo- <i>p</i> |
| • corriente de pérdidas de superficie | • polarización directa | • silicio |
| • diodo | • polarización inversa | • temperatura ambiente |
| • diodo de unión | • portadores mayoritarios | • temperatura de unión |
| • dopaje | • portadores minoritarios | • tensión de ruptura |
| • efecto avalancha | • recombinación | • unión <i>pn</i> |
| • electrón libre | • semiconductor | • zona de deplexión |

Para comprender cómo funcionan los diodos, los transistores y los circuitos integrados es necesario estudiar los materiales semiconductores: componentes que no se comportan ni como conductores ni como aislantes. Los semiconductores poseen algunos electrones libres, pero lo que les confiere un carácter especial es la presencia de huecos. En este capítulo se aprenderán los conceptos relacionados con los semiconductores y sus propiedades más relevantes.

2-1. CONDUCTORES

El cobre es un buen conductor. La razón es evidente si se tiene en cuenta su estructura atómica, como se ve en la Figura 2-1. El núcleo o centro del átomo contiene 29 protones (cargas positivas). Cuando un átomo de cobre tiene una carga neutra, 29 electrones (cargas negativas) se disponen alrededor del núcleo. Los electrones viajan en distintas *orbitales* (también llamados *capas*). Hay 2 electrones en el primer orbital, 8 electrones en el segundo, 18 en el tercero y 1 en el orbital exterior.

☐ Orbitales estables

El núcleo atómico atrae a los electrones orbitales (Fig. 2-1). Éstos no caen hacia el núcleo debido a la fuerza centrífuga (hacia fuera) creada por su

movimiento orbital. Cuando un electrón se halla en un orbital estable, la fuerza centrífuga equilibra exactamente la atracción eléctrica ejercida por el núcleo. La idea es similar a un satélite en órbita alrededor de la tierra, que a la velocidad y altura adecuadas, puede permanecer en una orbital estable sobre la tierra.

Cuanto más lejana es la órbita de un electrón menor es la atracción del núcleo. Los electrones de los orbitales más alejados del centro se mueven a menor velocidad, produciendo menos fuerza centrífuga. El electrón más externo en la Figura 2-1 viaja muy lentamente y prácticamente no se siente atraído hacia el núcleo.

□ La parte interna

En electrónica, lo único que importa es el orbital exterior, el cual también se denomina **orbital de valencia**. Es este orbital exterior el que determina las propiedades eléctricas del átomo. Para subrayar la importancia de dicho orbital de valencia, se define la parte interna de un átomo como el núcleo más todos los orbitales internos. Para un átomo de cobre, la parte interna es el núcleo (+29) y los tres primeros orbitales (-28).

La parte interna de un átomo de cobre tiene una carga resultante de +1, porque tiene 29 protones y 28 electrones internos. La Figura 2-2 permite visualizar la parte interna y el orbital de valencia de un átomo. El electrón de valencia se encuentra en un orbital exterior alrededor de la parte interna y tiene una carga resultante de +1. A causa de ello, la atracción que sufre el electrón de valencia es muy pequeña.

□ Electrón libre

Como el electrón de valencia es atraído muy débilmente por la parte interna del átomo, una fuerza externa puede arrancar fácilmente este electrón, al que se le conoce como *electrón libre*, y, por eso mismo, el cobre es un buen

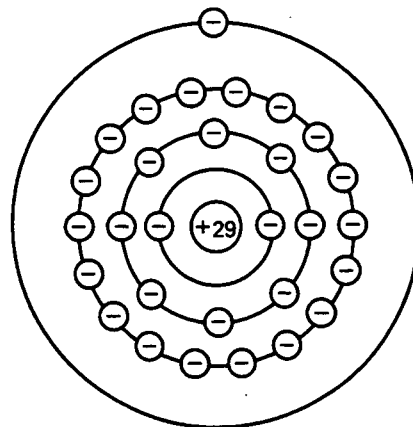


Figura 2-1. Átomo de cobre.

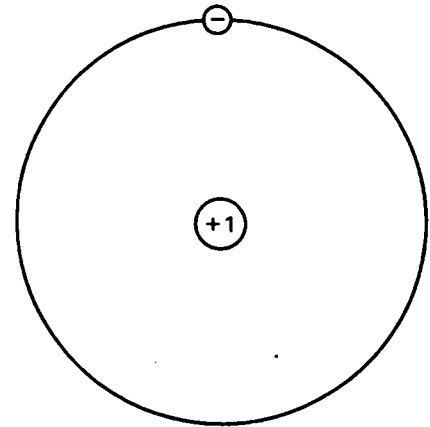


Figura 2-2. Diagrama de la parte interna de un átomo de cobre.

conductor. Incluso la tensión más pequeña puede hacer que los electrones libres de un conductor se muevan de un átomo al siguiente. Los mejores conductores son la plata, el cobre y el oro. Todos tienen una parte interna como la que se representa en la Figura 2-2.

EJEMPLO 2-1

Supongamos que una fuerza exterior arranca el electrón de valencia de la Figura 2-2 de un átomo de cobre. ¿Cuál es la carga resultante del átomo de cobre? ¿Y si un electrón exterior entra en la orbital de valencia de la Figura 2-2?

SOLUCIÓN

Cuando el electrón de valencia se va, la carga resultante del átomo es de $+1$. Si un átomo neutro pierde uno o más electrones se convierte en un átomo cargado positivamente, que recibe el nombre de *ión positivo*.

Cuando un electrón exterior entra dentro del orbital de valencia de la Figura 2-2, la carga resultante del átomo es igual a -1 . Si un átomo tiene un electrón extra en la orbital de valencia, llamamos al átomo cargado negativamente *ión negativo*.

2-2. SEMICONDUCTORES

Los mejores conductores (plata, cobre y oro) tienen un electrón de valencia, mientras que los mejores aislantes poseen ocho electrones de valencia. Un *semiconductor* es un elemento con propiedades eléctricas entre las de un conductor y las de un aislante. Como cabría esperar, los mejores semiconductores tienen cuatro electrones de valencia.

□ Germanio

El germanio es un ejemplo de semiconductor. Tiene cuatro electrones en su orbital de valencia. Hace unos años el germanio era el único material adecuado para la fabricación de dispositivos de semiconductores. Sin embargo, estos dispositivos de germanio tenían un grave inconveniente, que no pudo ser resuelto por los ingenieros: su excesiva corriente inversa (que se discutirá en una sección posterior). Más tarde, otro semiconductor, el *silicio*, se hizo más práctico dejando obsoleto al germanio en la mayoría de las aplicaciones electrónicas.

□ Silicio

Después del oxígeno, el silicio es el elemento más abundante de la tierra. Sin embargo, existieron algunos problemas que impidieron su uso en los primeros días de los semiconductores. Una vez resueltos, las ventajas del

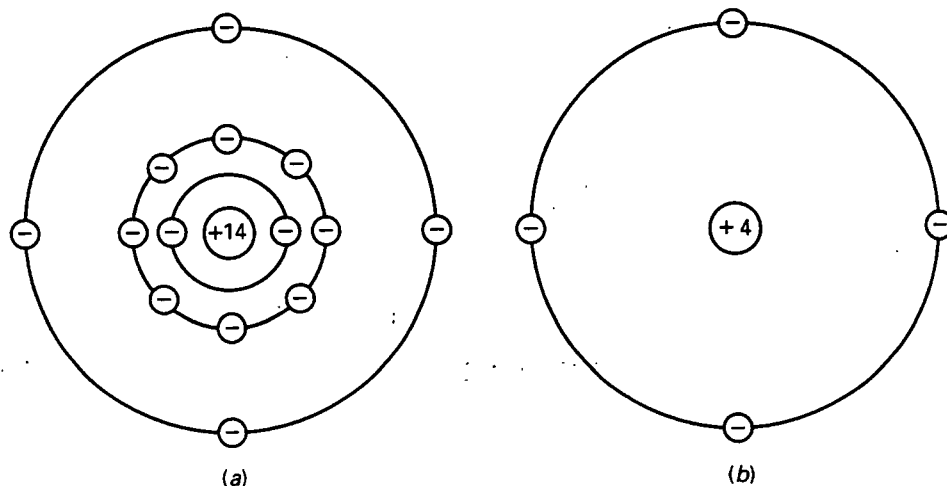


Figura 2-3. a) Átomo de silicio; b) diagrama de la parte interna.

silicio (discutidas posteriormente) lo convirtieron inmediatamente en el semiconductor a elegir. Sin él, la electrónica moderna, las comunicaciones y los ordenadores serían imposibles.

Un átomo de silicio aislado tiene 14 protones y 14 electrones. En la Figura 2-3a el primer orbital contiene 2 electrones y el segundo 8. Los 4 electrones restantes se encuentran en el orbital de valencia. En la Figura 2-3a, la parte interna tiene una carga resultante de +4 porque contiene 14 protones en el núcleo y 10 electrones en los dos primeros orbitales.

La Figura 2-3b muestra la parte interna de un átomo de silicio. Los 4 electrones de valencia nos indican que el silicio es un semiconductor.

EJEMPLO 2-2

¿Cuál es la carga resultante del átomo de silicio de la Figura 2-3b si pierde uno de sus electrones de valencia? ¿Y si gana un electrón extra en el orbital de valencia?

SOLUCIÓN

Si pierde un electrón de valencia, se convierte en un ión positivo con carga +1. Si el átomo de silicio gana un electrón de valencia extra, se transforma en un ión negativo, con una carga -1.

2-3. CRISTALES DE SILICIO

Cuando los átomos de silicio se combinan para formar un sólido, lo hacen en una estructura ordenada llamada *crystal*. Cada átomo de silicio comparte sus electrones de valencia con los átomos de silicio vecinos, de tal manera que tiene 8 electrones en el orbital de valencia. Por ejemplo, la Figura 2-4a

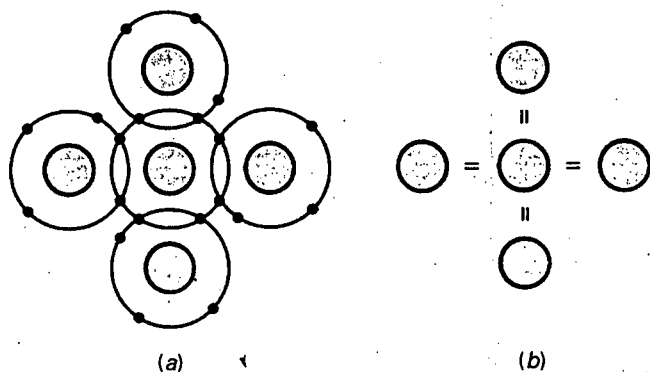


Figura 2-4. a) Un átomo de un cristal tiene cuatro vecinos; b) enlaces covalentes.

muestra un átomo central con 4 vecinos. Los círculos sombreados representan los cinco núcleos de silicio. Aunque el átomo central tenía originalmente 4 electrones en su orbital de valencia, ahora posee 8.

□ Enlaces covalentes

Cada átomo vecino comparte un electrón con el átomo central. De esta forma, el átomo central parece tener 4 electrones adicionales, sumando un total de 8 electrones en su orbital de valencia. En realidad, los electrones dejan de pertenecer a un solo átomo, ya que cada átomo central y sus vecinos comparten electrones. La misma idea es válida para todos los demás átomos de silicio. En resumen, cada átomo dentro de un cristal de silicio tiene cuatro vecinos.

En la Figura 2-4a, cada núcleo presenta una carga de +4. Obsérvese la parte interna central y la que está a su derecha. Estas dos partes mantienen el par de electrones entre ellas atrayéndolos con fuerzas iguales y opuestas. Este equilibrio entre las fuerzas es el que mantiene unidos a los átomos de silicio. La idea es similar a la del juego de tirar de la cuerda. Mientras los equipos tiren con fuerzas iguales y opuestas, permanecerán unidos.

Como cada uno de los electrones compartidos en la Figura 2-4a está siendo atraído en direcciones opuestas, el electrón constituye un enlace entre los núcleos opuestos. A este tipo de enlace químico se le da el nombre de *enlace covalente*. La Figura 2-4b es una forma simple de mostrar el concepto de enlaces covalentes. En un cristal de silicio hay miles de millones de átomos de silicio, cada uno con 8 electrones de valencia. Estos electrones de valencia son los enlaces covalentes que mantienen unido el cristal, dándole solidez.

□ Saturación de valencia

Cada átomo en un cristal de silicio tiene 8 electrones en su orbital de valencia. Estos 8 electrones producen una estabilidad química que da como resultado un cuerpo compacto de material de silicio. Nadie está seguro por qué el

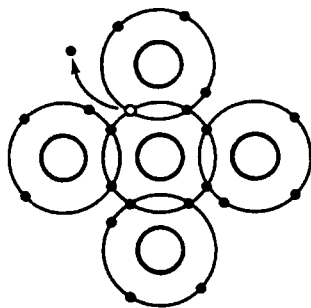
orbital exterior de todos los elementos tiene una predisposición a tener ocho electrones. Cuando no existen ocho electrones de forma natural en un elemento, éste tiende a combinarse y a compartir electrones con otros átomos para obtener ocho electrones en el orbital exterior.

Hay ecuaciones matemáticas complicadas que explican parcialmente por qué ocho electrones producen estabilidad química en diferentes materiales, pero no se sabe la razón intrínseca por la cual el número ocho es tan especial. Se trata de una ley experimental, como la ley de la gravedad, la de Coulomb y otras leyes que observamos pero que no podemos explicar completamente. Estableciéndolo como una ley tenemos:

$$\text{Saturación de valencia: } n = 8 \quad (2-1)$$

Dicho de otro modo, el orbital de valencia no puede soportar más de ocho electrones. Además, los ocho electrones de valencia se llaman **electrones ligados** por encontrarse fuertemente unidos a los átomos. Debido a estos electrones ligados, un cristal de silicio es casi un aislante perfecto a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C).

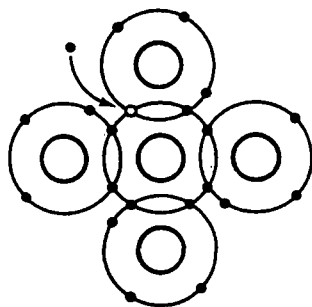
□ El hueco



(a)

La temperatura ambiente es la temperatura del aire circundante. Cuando dicha temperatura es mayor que el cero absoluto (−273 °C), la energía térmica del aire circundante hace que los átomos en un cristal de silicio vibren dentro del cristal. Cuanto mayor sea la temperatura, más intensas serán las vibraciones mecánicas de estos átomos. Si se toca un objeto, el calor que transmite proviene de la vibración de los átomos.

Las vibraciones de los átomos de silicio pueden, ocasionalmente, hacer que se desligue un electrón del orbital de valencia. Cuando esto sucede, el electrón liberado gana la energía suficiente para situarse en un orbital de nivel energético mayor, como se muestra en la Figura 2-5a. En dicho orbital, el electrón es un electrón libre.



(b)

Pero eso no es todo. La salida del electrón deja un vacío, que se denomina hueco, en el orbital de valencia (Fig. 2-5a), y que se comporta como una carga positiva porque, como ya se ha visto, la pérdida de un electrón produce un ión positivo.

□ Recombinación y tiempo de vida

En un cristal de silicio puro se crean igual número de electrones libres que de huecos debido a la energía térmica (calor). Los electrones libres se mueven de forma aleatoria a través del cristal. En ocasiones, un electrón libre se aproximará a un hueco, será atraído y caerá hacia él. Esta *unión de un electrón libre y de un hueco* se llama **recombinación** (Fig. 2-5b).

El tiempo que transcurre entre la creación y la desaparición de un electrón libre recibe el nombre de **tiempo de vida**, que varía desde unos cuantos nanosegundos a varios microsegundos, según la perfección del cristal y otros factores.

Figura 2-5. a) La energía térmica produce un electrón y un hueco;
b) recombinación de un electrón libre y un hueco.

❑ Ideas principales

En todo instante, lo que está sucediendo dentro de un cristal de silicio se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Se están creando electrones libres y huecos por la acción de la energía térmica.
2. Otros electrones libres y huecos se están recombinando.
3. Algunos electrones libres y huecos existen temporalmente esperando una recombinación.

EJEMPLO 2-3

Si un cristal puro de silicio tiene un millón de electrones libres, ¿cuántos huecos tiene? ¿Qué sucede con el número de electrones libres y huecos si aumenta la temperatura ambiente?

SOLUCIÓN

Observemos la Figura 2-5a. Cuando la energía térmica crea un electrón libre, al mismo tiempo crea automáticamente un hueco. Por tanto, un cristal puro de silicio siempre tiene el mismo número de huecos que de electrones libres. Si hay un millón de electrones libres, habrá un millón de huecos.

Una temperatura mayor aumenta las vibraciones a nivel atómico, lo cual supone la creación de más electrones libres y huecos. Pero independientemente de la temperatura, un cristal puro de silicio tiene la misma cantidad de electrones libres que de huecos.

2-4. SEMICONDUCTORES INTRÍNSECOS

Un **semiconductor intrínseco** es un *semiconductor puro*. Un cristal de silicio es un semiconductor intrínseco si cada átomo del cristal es un átomo de silicio. A temperatura ambiente, un cristal de silicio se comporta más o menos como un aislante, ya que tiene solamente unos cuantos electrones libres y sus huecos correspondientes producidos por la energía térmica que posee dicho cristal.

❑ Flujo de electrones libres

La Figura 2-6 muestra parte de un cristal de silicio situado entre dos placas metálicas cargadas. Supóngase que la energía térmica ha producido un electrón libre y un hueco. El electrón libre se halla en un orbital de mayor energía en el extremo derecho del cristal. Debido a que el electrón está cerca de la placa cargada negativamente, es repelido por ésta, de forma que se desplaza hacia la izquierda de un átomo a otro hasta que alcanza la placa positiva.

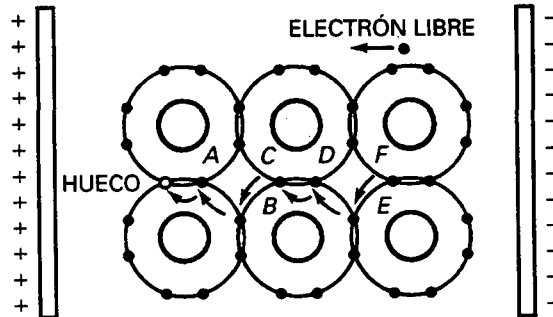


Figura 2-6. Flujo de un hueco a través de un semiconductor.

□ Flujo de huecos

Obsérvese el hueco a la izquierda de la Figura 2-6. Este hueco atrae al electrón de valencia del punto A, lo que provoca que dicho electrón se desplace hacia el hueco.

Cuando el electrón de valencia en el punto A se mueve hacia la izquierda, crea un nuevo hueco en este punto. El efecto es el mismo que si el hueco original se desplazara hacia la derecha. El nuevo hueco en el punto A puede atraer y capturar otro electrón de valencia. De esta forma, los electrones de valencia pueden moverse a lo largo de la trayectoria indicada por las flechas. Esto quiere decir que el hueco lo hace en el sentido opuesto a lo largo de la trayectoria A-B-C-D-E-F, actuando de la misma forma que una carga positiva.

2-5. DOS TIPOS DE FLUJO

La Figura 2-7 muestra un semiconductor intrínseco. Tiene el mismo número de electrones libres que de huecos. Esto se debe a que la energía térmica produce los electrones libres y los huecos por pares. La tensión aplicada forzará a los electrones libres a circular hacia la izquierda y a los huecos hacia la derecha. Cuando los electrones libres llegan al extremo izquierdo del cristal, entran al conductor externo y circulan hacia el terminal positivo de la batería.

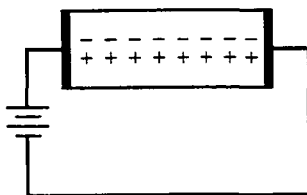


Figura 2-7. Un semiconductor intrínseco tiene el mismo número de electrones libres y huecos.

Por otra parte, los electrones libres en el terminal negativo de la batería circularán hacia el extremo derecho del cristal. En este punto, entran en el cristal y se recombinan con los huecos que llegan al extremo derecho del cristal. Así, se produce un flujo estable de electrones libres y huecos dentro del semiconductor. Nótese que no hay flujo de huecos por fuera del semiconductor.

En la Figura 2-7, los electrones libres y los huecos se mueven en direcciones opuestas. En lo sucesivo concebiremos la corriente en un semiconductor como el efecto combinado de los dos tipos de flujo: el de los electrones libres en una dirección y el de los huecos en la opuesta. Los electrones libres y los huecos reciben a menudo la denominación común de portadores debido a que transportan la carga eléctrica de un lugar a otro.

2-6. DOPAJE DE UN SEMICONDUCTOR

Una forma de aumentar la conductividad de un semiconductor es mediante el dopaje. El **dopaje** supone que, deliberadamente, *se añaden átomos de impurezas a un cristal intrínseco para modificar su conductividad eléctrica*. Un *semiconductor dopado* se llama **semiconductor extrínseco**.

□ Aumento del número de electrones libres

¿Cuál es el proceso de dopaje de un cristal de silicio? El primer paso consiste en fundir un cristal puro de silicio para romper los enlaces covalentes y cambiar el estado del silicio de sólido a líquido. Con el fin de aumentar el número de electrones libres, se añaden átomos pentavalentes al silicio fundido. Los átomos pentavalentes tienen 5 electrones en el orbital de valencia. El arsénico, el antimonio y el fósforo son ejemplos de átomos pentavalentes. Como estos materiales donarán un electrón extra al cristal de silicio se les conoce como impurezas donadoras.

La Figura 2-8a representa cómo queda el cristal de silicio después de enfriarse y volver a formar su estructura de cristal sólido. En el centro se halla un átomo pentavalente rodeado por cuatro átomos de silicio. Como antes, los átomos vecinos comparten un electrón con el átomo central, pero en este caso queda un electrón adicional. Recuérdese que cada átomo pentavalente tiene 5 electrones de valencia. Como únicamente pueden situarse ocho electrones en la orbital de valencia, el electrón adicional queda en un orbital mayor. Por tanto, se trata de un electrón libre.

Cada átomo pentavalente, o donante en un cristal de silicio, produce un electrón libre. Un fabricante controla así la conductividad de un semiconductor dopado. Cuantas más impurezas se añadan, mayor será la conductividad. Así, un semiconductor se puede dopar ligera o fuertemente. Un semiconductor dopado ligeramente tiene una resistencia alta y uno fuertemente dopado tiene una resistencia pequeña.

□ Aumento del número de huecos

¿Cómo dopar un cristal de silicio para obtener un exceso de huecos? La respuesta es utilizando una impureza trivalente; es decir, una impureza cuyos átomos tengan sólo 3 electrones de valencia, como, por ejemplo, el aluminio, el boro o el galio.

La Figura 2-8b muestra un átomo trivalente en el centro. Está rodeado por cuatro átomos de silicio, cada uno compartiendo uno de sus electrones de valencia. Como el átomo trivalente tenía al principio sólo 3 electrones de valencia y comparte un electrón con cada uno de sus vecinos, hay sólo 7 electrones en el orbital de valencia. Esto significa que aparece un hueco en el orbital de valencia de cada átomo trivalente. Un átomo trivalente se denomina también *átomo aceptor*, porque cada uno de los huecos con que contribuye puede aceptar un electrón libre durante la recombinación.

□ Puntos que hay que recordar

Para que un fabricante pueda dopar un semiconductor debe producirlo inicialmente como un cristal absolutamente puro. Controlando posteriormente la cantidad de impurezas, se pueden determinar con precisión las propieda-

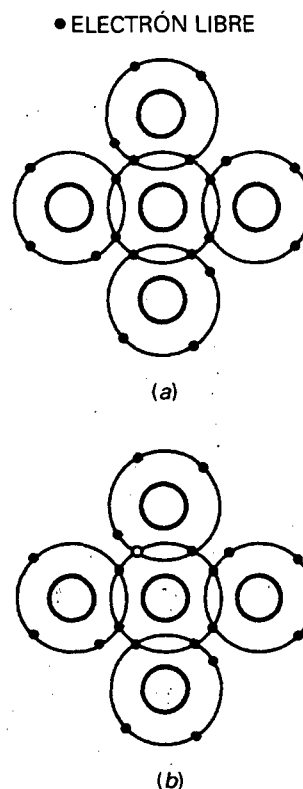


Figura 2-8. a) Dopaje para obtener más electrones libres; b) dopaje para obtener más huecos.

des del semiconductor. Inicialmente resultaba más fácil producir cristales puros de germanio que de silicio. Por esta razón los primeros dispositivos semiconductores estaban hechos de germanio. Después mejoraron las técnicas de fabricación y se pudieron obtener cristales puros de silicio. Por las ventajas que tiene, el silicio se ha erigido como el material semiconductor más popular y útil.

EJEMPLO 2-4

Un semiconductor dopado tiene 10.000 millones de átomos de silicio y 15 millones de átomos pentavalentes. Si la temperatura ambiente es de 25 °C, ¿cuántos electrones libres y huecos hay dentro del semiconductor?

SOLUCIÓN

Cada átomo pentavalente aporta un electrón libre. Por tanto, el semiconductor tiene 15 millones de electrones libres producidos por el dopado. Casi no habrá huecos, ya que los únicos huecos en el semiconductor son los producidos por excitación térmica.

2-7. DOS TIPOS DE SEMICONDUCTORES EXTRÍNSECOS

Un semiconductor se puede dopar para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos. Debido a ello existen dos tipos de semiconductores dopados.

□ Semiconductor tipo *n*

El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se llama semiconductor tipo *n*, donde *n* hace referencia a negativo. En la Figura 2-9 se muestra un semiconductor tipo *n*. Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo *n*, reciben el nombre de *portadores mayoritarios*, mientras que a los huecos se les denomina *portadores minoritarios*.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres dentro del semiconductor se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

Los electrones libres mostrados en la Figura 2-9 circulan hacia el extremo izquierdo del cristal, donde entran al conductor para circular hacia el terminal positivo de la batería.

□ Semiconductor tipo *p*

El silicio que ha sido dopado con impurezas trivalentes se llama semiconductor tipo *p*, donde *p* hace referencia a positivo. La Figura 2-10 representa un semiconductor tipo *p*. Como el número de huecos supera al número de

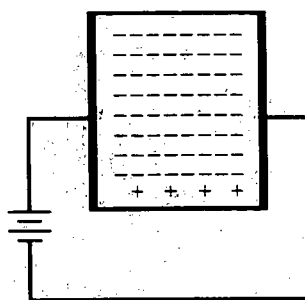


Figura 2-9. El semiconductor tipo *n* tiene muchos electrones libres.

electrones libres, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los minoritarios.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres se mueven hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. En la Figura 2-10, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.

En el diagrama de la Figura 2-10 hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como hay muy pocos portadores minoritarios, su efecto es casi despreciable en este circuito.

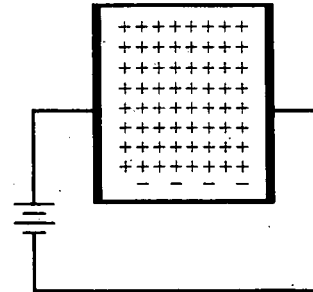


Figura 2-10.
El semiconductor tipo *p* tiene muchos huecos.

2-8. EL DIODO NO POLARIZADO

Por sí mismo, un cristal semiconductor tipo *n* tiene la misma utilidad que una resistencia de carbón; lo que también se puede decir de un semiconductor tipo *p*. Pero ocurre algo nuevo cuando un fabricante dopa un cristal de tal manera que una mitad sea tipo *p* y la otra mitad sea tipo *n*.

La separación o frontera física entre un semiconductor tipo *n* y uno tipo *p* se llama unión *pn*. La unión *pn* tiene propiedades tan útiles que ha propiciado toda clase de inventos, entre los que se encuentran los diodos, los transistores y los circuitos integrados. Comprender la unión *pn* permite entender toda clase de dispositivos fabricados con semiconductores.

□ El diodo no polarizado

Como se ha expuesto en la sección anterior, cada átomo trivalente en un cristal de silicio produce un hueco. Por esta razón puede representarse un cristal de semiconductor tipo *p* como se aprecia en el lado izquierdo de la Figura 2-11. Cada signo menos (-) encerrado en un círculo representa un átomo trivalente y cada signo más (+) es un hueco en su orbital de valencia.

De manera similar, los átomos pentavalentes y los huecos en un semiconductor tipo *n* se pueden representar como se aprecia en el lado derecho de la Figura 2-11. Cada signo más encerrado en un círculo representa un átomo pentavalente y cada signo menos es el electrón libre con que contribuye al semiconductor. Obsérvese que cada cristal de material semiconductor es eléctricamente neutro porque el número de signos menos y más es igual.

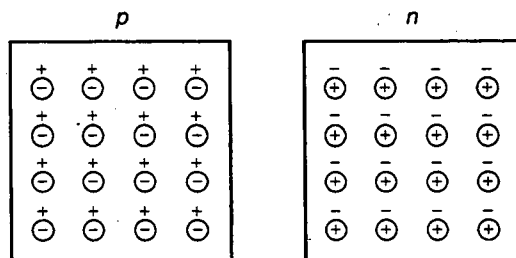


Figura 2-11. Dos tipos de semiconductores.

Un fabricante puede producir un cristal de material tipo p en un lado y de tipo n en el otro lado, como se muestra en la Figura 2-12. La unión es la frontera donde se juntan las regiones tipo n y las de tipo p , por lo que esta estructura se llama también *diodo de unión* (la palabra diodo es una contracción de la expresión «dos electrodos»), donde *di* significa *dos*.

□ La zona de deplexión

Debido a su repulsión mutua, los electrones libres en el lado n de la Figura 2-12 tienden a dispersarse en cualquier dirección. Algunos electrones libres se difunden atravesando la unión. Cuando un electrón libre entra en la región p se convierte en un portador minoritario. Con tantos huecos a su alrededor, este electrón tiene un tiempo de vida muy corto. Poco después de entrar en la región p , el electrón libre cae en un hueco. Cuando esto sucede, el hueco desaparece y el electrón libre se convierte en un electrón de valencia. Cada ocasión en la que un electrón se difunde a través de la unión, crea un par de iones. Cuando un electrón abandona el lado n , deja un átomo pentavalente al que le hace falta una carga negativa; este átomo se convierte en ión positivo. Una vez que el electrón cae en un hueco en el lado p , el átomo trivalente que lo ha capturado se convierte en ión negativo.

En la Figura 2-13a se muestran estos iones a cada lado de la unión. Los signos más (+) encerrados en círculos representan los iones positivos, mientras que los signos menos (−) encerrados en círculos representan los iones negativos. Los iones se encuentran fijos en la estructura del cristal debido a los enlaces covalentes y no pueden moverse de un lado a otro como los electrones libres y los huecos.

Cada pareja de iones positivo y negativo en la unión se llama dipolo. La creación de un dipolo hace que desaparezcan un electrón libre y un hueco. A medida que aumenta el número de dipolos, la región cercana a la unión se vacía de portadores. A esta *zona sin portadores* se la conoce como **zona de deplexión** (Fig. 2-13b).

□ Barrera de potencial

Cada dipolo posee un campo eléctrico entre los iones positivo y negativo que lo forman; por tanto, si entran electrones libres adicionales en la zona de deplexión, el campo eléctrico trata de devolver estos electrones hacia la zona n . La intensidad del campo eléctrico aumenta con cada electrón que

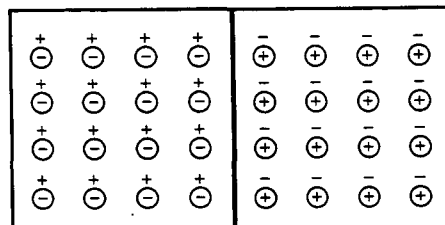


Figura 2-12. La unión pn .

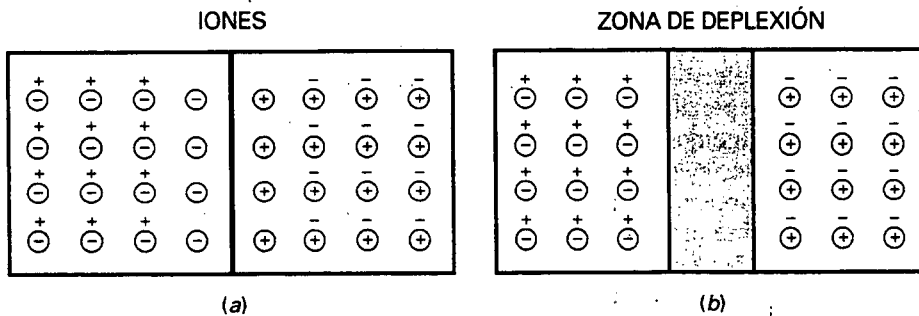


Figura 2-13. a) Creación de iones en la unión; b) zona de deplexión.

cruza hasta que se alcanza el equilibrio. En una primera aproximación, esto significa que el campo acabará por detener la difusión de electrones a través de la unión.

En la Figura 2-13 el campo eléctrico entre los iones es equivalente a una diferencia de potencial llamada **barrera de potencial**. A 25 °C la barrera de potencial es aproximadamente de 0,3 V para diodos de germanio y de 0,7 V para diodos de silicio.

2-9. POLARIZACIÓN DIRECTA

En la Figura 2-14 se ve una fuente de corriente continua conectada a un diodo. El terminal negativo de la fuente está conectado al material tipo *n*, y el terminal positivo al material tipo *p*. Esta conexión se llama **polarización directa**.

❑ Flujo de electrones libres

En la Figura 2-14 la batería empuja huecos y electrones libres hacia la unión. Si la tensión de la batería es menor que la barrera de potencial, los electrones libres no tienen suficiente energía para atravesar la zona de deplexión. Cuando entran en esta zona, los iones se ven empujados de regreso a la zona *n*. A causa de esto no circula corriente a través del diodo.

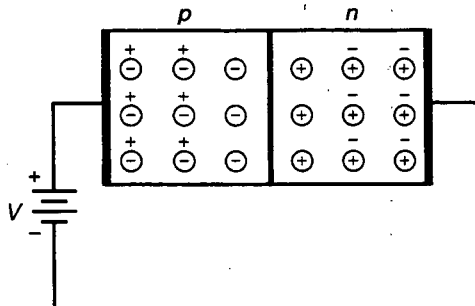


Figura 2-14. Polarización directa.

Cuando la fuente de tensión continua es mayor que la barrera de potencial, la batería empuja de nuevo huecos y electrones libres hacia la unión. Esta vez los electrones libres tienen suficiente energía para pasar a través de la zona de deplexión y recombinarse con los huecos. Para hacerse una idea básica, imaginemos todos los huecos en la zona p moviéndose hacia la derecha y todos los electrones libres desplazándose hacia la izquierda. En algún lugar próximo a la unión estas cargas opuestas se recombinan. Como los electrones libres entran continuamente por el extremo derecho del diodo y continuamente se crean huecos en el extremo izquierdo, existe una corriente continua a través del diodo.

□ El flujo de un electrón

Sigamos a un único electrón a lo largo del circuito completo. Después de que el electrón libre abandona el terminal negativo de la batería entra en el extremo derecho del diodo. Viaja a través de la región n hasta que alcanza la unión. Cuando la tensión de la batería es mayor que 0,7 V, el electrón libre tiene energía suficiente para atravesar la zona de deplexión. Poco después de entrar en la región p se recombina con un hueco.

En otras palabras, el electrón libre se convierte en un electrón de valencia. Como tal continúa su viaje hacia la izquierda, pasando de un hueco al siguiente hasta que alcanza el extremo izquierdo del diodo. Cuando deja este último, aparece un nuevo hueco y el proceso comienza otra vez. Como hay miles de millones de electrones haciendo el mismo viaje, tenemos una corriente continua a través del diodo.

□ Recordatorio

La corriente circula fácilmente en un diodo de silicio polarizado en directa. Cuando la tensión aplicada sea mayor que la barrera de potencial habrá una gran corriente continua en el circuito. En otras palabras, si la fuente de tensión es mayor que 0,7 V, un diodo de silicio produce una corriente continua en la dirección directa.

2-10. POLARIZACIÓN INVERSA

Si se invierte la polaridad de la fuente de continua, entonces el diodo quedará polarizado en inversa, como se ve en la Figura 2-15. En este caso, el terminal negativo de la batería se encuentra conectado al lado p y el terminal positivo lo está al lado n . Esta conexión se denomina **polarización inversa**.

□ Ensanchamiento de la zona de deplexión

El terminal negativo de la batería atrae los huecos y el terminal positivo los electrones libres; por ello, los huecos y electrones libres se alejan de la unión; como resultado, la zona de deplexión se ensancha.

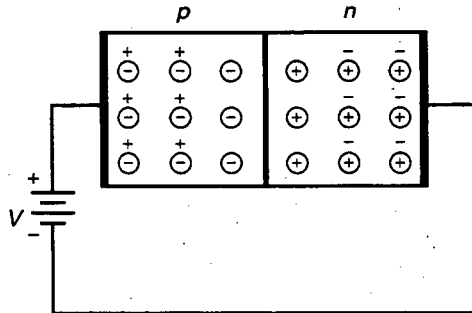


Figura 2-15. Polarización inversa.

¿Cuánto aumenta la anchura de la zona de deplexión en la Figura 2-16a? Cuando los huecos y los electrones se alejan de la unión, los iones recién creados hacen que aumente la diferencia de potencial a través de la zona de deplexión. A mayor anchura de dicha zona corresponde mayor diferencia de potencial. La zona de deplexión deja de aumentar en el momento en que su diferencia de potencial es igual a la tensión inversa aplicada. Cuando esto sucede los electrones y los huecos no se alejan de la unión.

En ocasiones, la zona de deplexión se muestra como una zona sombreada como la de la Figura 2-16. La anchura de esta zona sombreada es proporcional a la tensión inversa. A medida que la tensión inversa crece, aumenta también la zona de deplexión.

❑ Corriente de portadores minoritarios

¿Existe alguna corriente después de haberse estabilizado la zona de deplexión? Sí. Incluso con polarización inversa hay una pequeña corriente. Recuérdese que la energía térmica crea continuamente pares de electrones libres y huecos, lo que significa que a ambos lados de la unión existen pequeñas concentraciones de portadores minoritarios. La mayor parte de éstos se recombinan con los portadores mayoritarios, pero los que se hallan dentro de la zona de deplexión pueden vivir lo suficiente para cruzar la unión. Cuando esto sucede, por el circuito externo circula una pequeña corriente.

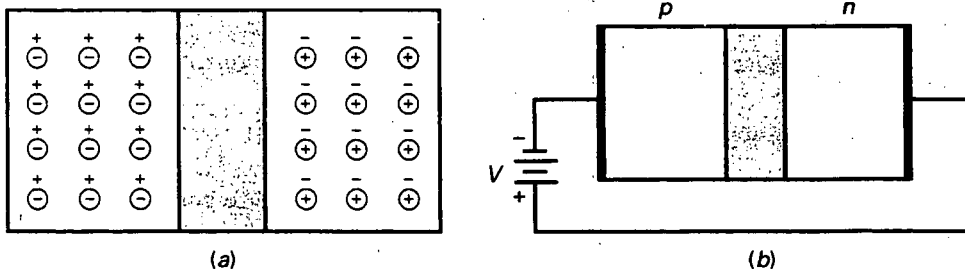


Figura 2-16. a) Zona de deplexión; b) incrementar la polarización inversa aumenta el ancho de la zona de deplexión.

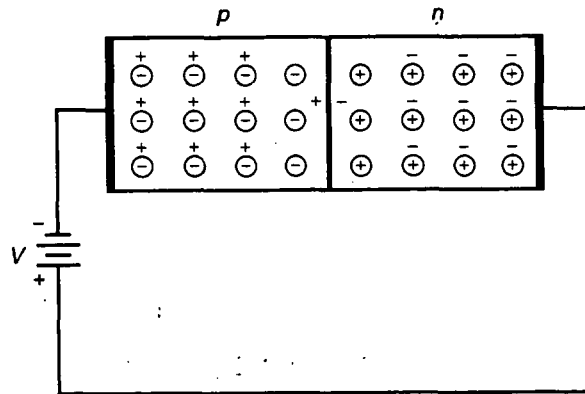


Figura 2-17. La producción térmica de electrones libres y huecos en la zona de deplexión produce una corriente inversa de saturación minoritaria.

En la Figura 2-17 se ilustra esta idea. Supóngase que la energía térmica ha creado un electrón libre y un hueco cerca de la unión. La zona de deplexión empuja al electrón libre hacia la derecha, provocando que un electrón deje el extremo derecho del cristal. El hueco en la zona de deplexión es empujado hacia la izquierda. Este hueco extra en el lado p ocasiona que un electrón entre por el extremo izquierdo del cristal y se recombine con un hueco. Como la energía térmica está creando constantemente pares electrón-hueco dentro de la zona de deplexión, se producirá continuamente una pequeña corriente en el circuito externo.

La *corriente inversa originada por los portadores minoritarios producidos térmicamente* se llama **corriente inversa de saturación**. En las ecuaciones esta corriente se simboliza por I_s . El nombre representa el hecho de que no se puede obtener una corriente de portadores minoritarios mayor que la producida por energía térmica; es decir, aumentar la tensión inversa no hará que crezca el número de portadores minoritarios creados térmicamente.

❑ Corriente superficial de fugas

Además de la corriente de portadores minoritarios producidos térmicamente, ¿existe alguna otra corriente en el diodo polarizado en inversa? Sí, una *pequeña corriente circula sobre la superficie del cristal*. Esta corriente se denomina **corriente superficial de fugas**, que es *causada por impurezas en la superficie del cristal e imperfecciones en su estructura interna*.

❑ Recordatorio

La corriente inversa total en un diodo es una corriente de portadores minoritarios muy pequeña y dependiente de la temperatura y una corriente de fugas superficial muy pequeña y directamente proporcional a la tensión aplicada. En muchas aplicaciones la corriente inversa de un diodo de silicio es tan pequeña que pasa inadvertida. La principal idea a recordar es que *la corriente es aproximadamente cero en un diodo de silicio polarizado en inversa*.

2-11. RUPTURA

Los diodos admiten unos valores máximos en las tensiones que se les aplican. Por tanto, existe un límite para la tensión máxima en inversa con que se puede polarizar un diodo sin correr el riesgo de destruirlo.

Si se aumenta continuamente la tensión inversa, llegará un momento en que se alcance la tensión de ruptura del diodo. Para muchos diodos, la tensión de ruptura es normalmente mayor de 50 V. La tensión de ruptura se muestra en la hoja de características del diodo. Hablaremos sobre las hojas de características en el Capítulo 3.

Una vez alcanzada la tensión de ruptura, una gran cantidad de portadores minoritarios aparece repentinamente en la zona de deplexión y el diodo conduce descontroladamente.

¿De dónde vienen estos portadores? Se producen por el *efecto de avalancha* (Fig. 2-18) que aparece con tensiones inversas elevadas. Como siempre, hay una pequeña corriente inversa de portadores minoritarios. Cuando la tensión inversa aumenta, obliga a los portadores minoritarios a moverse más rápidamente. De esta forma chocarán con los átomos del cristal. Si dichos portadores adquieren la energía suficiente, pueden golpear a los electrones de valencia y liberarlos; es decir, pueden producir electrones libres. Estos nuevos portadores minoritarios pueden unirse a los ya existentes para colisionar contra otros átomos. El proceso es geométrico, ya que un electrón libre libera a un electrón de valencia, obteniéndose dos electrones libres. Estos dos electrones libres liberan, a su vez, a otros dos de valencia, y así sucesivamente, de forma que el proceso continúa hasta que la corriente inversa es muy grande.

En la Figura 2-19 se observa una vista ampliada de la zona de deplexión. La polarización inversa obliga a los electrones libres a moverse hacia la derecha. Cada electrón, a medida que se desplaza, gana velocidad. Cuanto mayor sea la tensión inversa, más rápido se mueven los electrones. Si un electrón con una gran velocidad tiene la energía suficiente, puede golpear el electrón de valencia del primer átomo y colocarlo en una orbital mayor, lo que da como resultado dos electrones libres, los cuales pueden acelerarse y desligar dos electrones más. De esta forma, el número de portadores minoritarios puede llegar a ser demasiado grande y el diodo puede conducir sin control.

La tensión de ruptura de un diodo depende del nivel de dopaje del mismo. Con diodos rectificadores (el tipo más común), la tensión de ruptura suele ser mayor de 50 V.

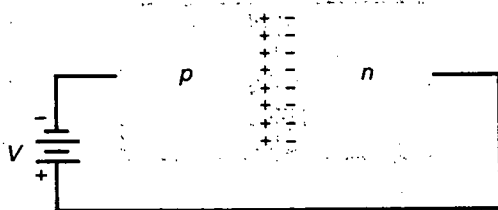


Figura 2-18. La avalancha produce muchos electrones libres y huecos en la zona de deplexión.

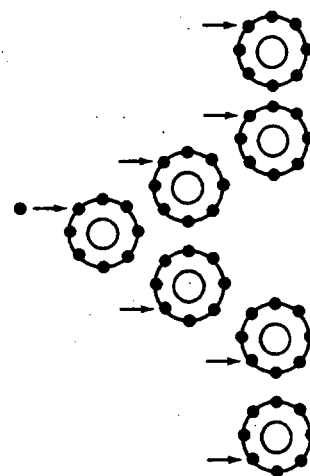


Figura 2-19. El proceso de avalancha es una progresión geométrica: 1, 2, 4, 8, ...

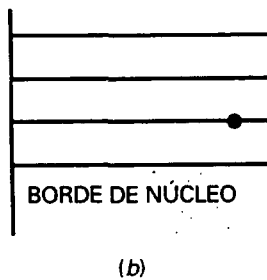
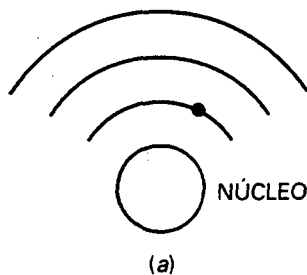


Figura 2-20. El nivel de energía es proporcional al tamaño de la orbital.
a) Orbitales; b) niveles de energía.

2-12. NIVELES DE ENERGÍA

Como una buena aproximación, la energía total de un electrón puede identificarse con el tamaño de su orbital. Es decir, puede pensarse que el tamaño de cada uno de sus radios (Fig. 2-20a) es equivalente a los niveles de energía representados en la Figura 2-20b. Los electrones de la orbital más pequeña están en el primer nivel de energía; los electrones de la segunda orbital están en el segundo nivel de energía y así sucesivamente.

□ Más energía en el orbital mayor

Como el electrón es atraído por el núcleo, se requiere energía adicional para llevarlo a un orbital mayor. Cuando un electrón salta de la primera al segundo orbital, gana energía potencial con respecto al núcleo. Algunos de los agentes externos que pueden hacer saltar a un electrón a un nivel de energía mayor son el calor, la luz y la tensión eléctrica.

Supóngase, por ejemplo, que una fuerza externa eleva el electrón de la primera al segundo orbital. Este electrón tiene más energía potencial porque está más alejado del núcleo. La situación es similar a la de un objeto situado sobre la Tierra. Cuanto más alto se halle el objeto, mayor será su energía potencial con respecto a la Tierra. Si se suelta el objeto, puede realizar un mayor trabajo al caer sobre la Tierra.

□ Los electrones pueden emitir luz

Después de que un electrón ha saltado a una orbital mayor, puede regresar a su nivel de energía inicial. Si lo hace, devolverá la energía sobrante en forma de calor, luz u otro tipo de radiación.

En un **diodo emisor de luz** (LED: *Light-Emitting Diode*), la tensión aplicada eleva los electrones a niveles superiores de energía. Cuando estos electrones caen de nuevo a los niveles inferiores de energía, desprenden luz. Dependiendo del material que se use en la fabricación del diodo, la luz es roja, verde, naranja o azul. Algunos LED producen radiación infrarroja (invisible), que es útil en sistemas de alarma antirrobo.

□ Bandas de energía

Cuando un átomo de silicio está aislado, la orbital de un electrón sólo se ve influida por las cargas del átomo aislado. Lo que provoca que los niveles de energía sean los que se representan por las líneas de la Figura 2-20b. Pero cuando los átomos de silicio están en un cristal la orbital de cada electrón también se ve influenciada por las cargas de muchos otros átomos de silicio. Como cada electrón tiene una posición única dentro de la red cristalina, no hay dos electrones que posean exactamente el mismo patrón de cargas alrededor. Ésta es la razón de que la orbital de cada electrón sea diferente; o, dicho de otro modo, los niveles de energía de cada electrón son distintos.

La Figura 2-21 muestra lo que le sucede a los niveles de energía. Todos los electrones de la primera orbital tienen niveles de energía ligeramente diferentes porque no hay dos electrones que vean exactamente el mismo

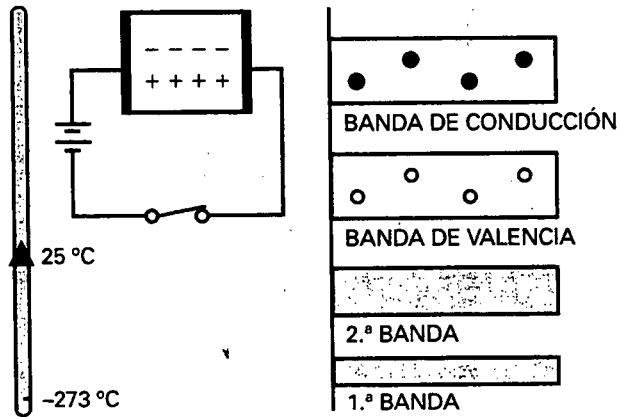


Figura 2-21. Semiconductor intrínseco y sus bandas de energía.

entorno de cargas. Como hay miles de millones de electrones en la primera orbital, estas ligeras diferencias de niveles de energía forman un grupo o *banda* de energía. Similarmente, los miles de millones de electrones de la segunda orbital forman la segunda banda de energía, y así sucesivamente para el resto de las bandas.

Otra aclaración. Como ya se sabe, la energía térmica produce unos pocos electrones libres y huecos. Los huecos permanecen en la banda de valencia, pero los electrones libres se mueven a la banda de energía inmediatamente superior, la cual se denomina *banda de conducción*. Éste es el motivo por el que la Figura 2-21 muestra una banda de conducción con algunos electrones libres y una banda de valencia con algunos huecos. Cuando se cierra el interruptor, existe una pequeña corriente en el semiconductor puro. Los electrones libres se desplazan a través de la banda de conducción y los huecos lo hacen a través de la banda de valencia.

□ Bandas de energía tipo *n*

La Figura 2-22 presenta las bandas de energía para un semiconductor tipo *n*. Como cabría esperar, los portadores mayoritarios son los electrones libres en la banda de conducción, y los minoritarios son los huecos en la banda de valencia. Como el interruptor está cerrado en la Figura 2-22, los portadores mayoritarios circulan hacia la izquierda y los minoritarios hacia la derecha.

□ Bandas de energía tipo *p*

La Figura 2-23 muestra las bandas de energía para un semiconductor tipo *p*. Aquí se observa una inversión de papeles de los portadores. Ahora los portadores mayoritarios son los huecos en la banda de valencia, y los minoritarios son los electrones de la banda de conducción. Como el interruptor está cerrado, los portadores mayoritarios circulan hacia la derecha y los minoritarios hacia la izquierda.

52 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

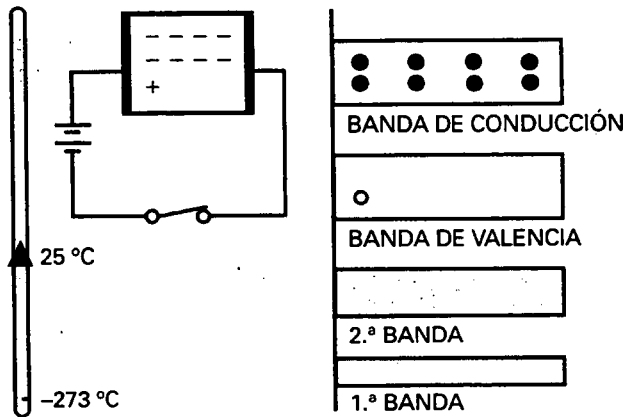


Figura 2-22. Semiconductor tipo *n* y sus bandas de energía.

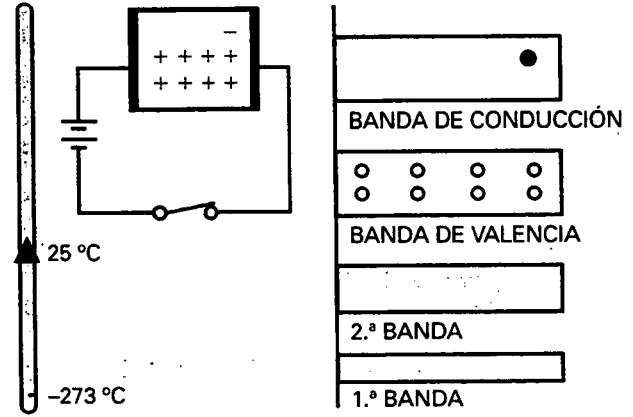


Figura 2-23. Semiconductor tipo *p* y sus bandas de energía.

2-13. LA BARRERA DE ENERGÍA

Para comprender el funcionamiento de tipos más avanzados de dispositivos semiconductores, es necesario conocer el modo en que los niveles de energía controlan la acción de una unión *pn*.

□ Antes de la difusión

Suponiendo una unión abrupta (es decir, una unión que pasa bruscamente del material tipo *p* al material tipo *n*), ¿cómo es el diagrama de energía correspondiente?

En la Figura 2-24a se representan las bandas de energía antes de que los electrones se hayan difundido a través de la unión. El lado *p* tiene gran cantidad de huecos en la banda de valencia y el lado *n* posee muchos electrones en la banda de conducción. Pero ¿por qué las bandas *p* están ligeramente más altas que las bandas *n*?

El lado *p* está formado por átomos trivalentes con una carga de la parte interna de +3, como se muestra en la Figura 2-24b. Por otra parte, el lado *n* tiene átomos pentavalentes con una carga de la parte interna de +5 (Figura 2-24c). La parte interna de +3 atrae a un electrón con menos fuerza que la parte interna de +5.

Por tanto, los orbitales de un átomo trivalente (lado *p*) son ligeramente mayores, en energía, que los de un átomo pentavalente (lado *n*).

Una unión abrupta como la de la Figura 2-24a es una idealización, ya que el lado *p* no puede terminar súbitamente donde comienza la región *n*. Un diodo real exhibe un cambio gradual de un material a otro.

Por esta razón, la Figura 2-25a constituye un diagrama de energía más realista de un diodo de unión.

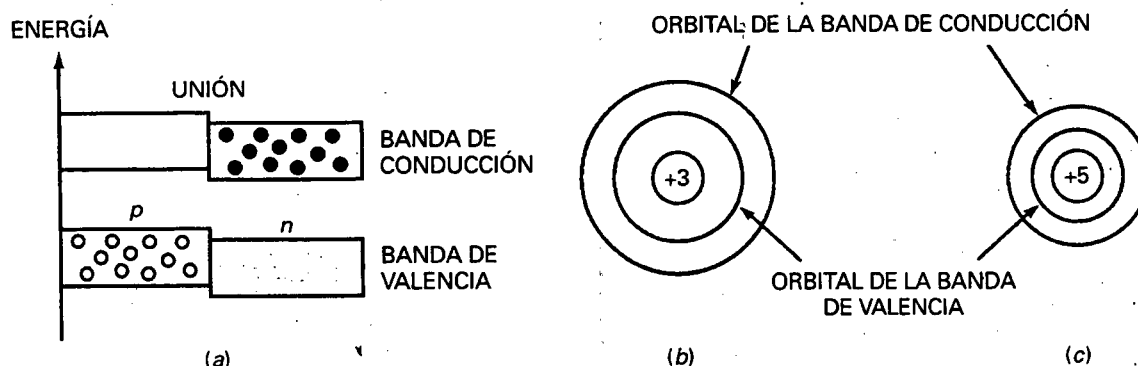


Figura 2-24. a) Bandas de energía de una unión abrupta antes de la difusión; b) los átomos de tipo *p* tienen orbitales más grandes, equivalentes a un nivel de energía mayor; c) los átomos de tipo *n* tienen orbitales más pequeñas, equivalentes a un nivel de energía menor.

□ En el equilibrio

En el instante inicial, cuando el diodo se forma, no existe la zona de depleción (Fig. 2-25a). En ese caso los electrones libres se difundirán a través de la unión. En términos de los niveles de energía, este hecho supone que los electrones de la parte superior de la banda de conducción *n* se muevan a través de la unión, como se describió antes. Inmediatamente después de cruzar la unión, un electrón libre se recombinará con un hueco; es decir, el electrón caerá de la banda de conducción a la banda de valencia y, al hacerlo, emitirá calor, luz y otras radiaciones. Esta recombinación no sólo crea la zona de depleción, sino que además cambia los niveles de energía en la unión.

La Figura 2-25b muestra los diagramas de energía después de que haya sido creada la zona de depleción. Las bandas *p* se han desplazado hacia arriba con respecto a las bandas *n*. Como se puede ver, la parte inferior de la banda *p* está al mismo nivel que la parte superior de la banda *n* correspondiente, lo que quiere decir que los electrones en el lado *n* ya no tienen energía suficiente para cruzar la unión. A continuación se da una explicación simplificada del desplazamiento hacia arriba de la banda *p*.

La Figura 2-25c contiene una orbital de la banda de conducción alrededor de uno de los átomos trivalentes antes de que se lleve a cabo la difusión. Cuando un electrón se difunde a través de la unión, cae en un hueco de un átomo trivalente (Fig. 2-25d). Este electrón extra en la orbital de valencia aumentará el tamaño del orbital de la banda de conducción, alejándola más del núcleo del átomo trivalente, como se aprecia en la Figura 2-25d. Por tanto, cualquier nuevo electrón que llegue a esta región necesitará más energía que antes para moverse en una orbital de la banda de conducción. Dicho en otros términos, el aumento del orbital de la banda de conducción indica que el nivel de energía se ha incrementado, lo que equivale a decir que las bandas *p* se desplazan hacia arriba con respecto a las bandas *n* después de que se crea la zona de depleción.

En el equilibrio, los electrones de la banda de conducción en el lado *n* se mueven en orbitales que no son lo suficientemente grandes para ajustarse a las orbitales del lado *p* (Fig. 2-25b). Es decir, los electrones en el lado *n* no

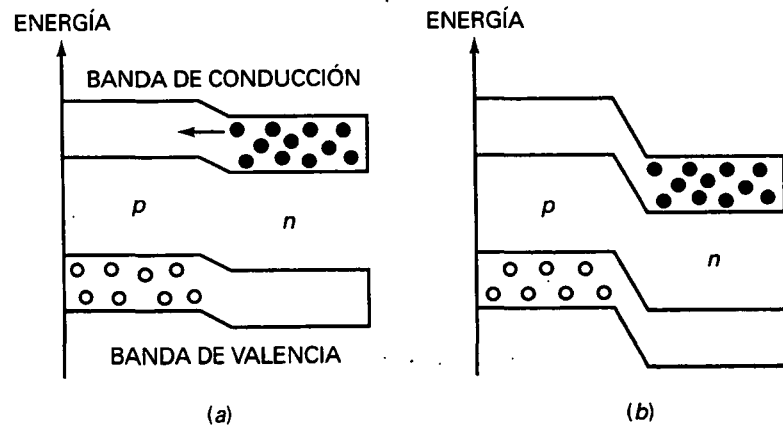
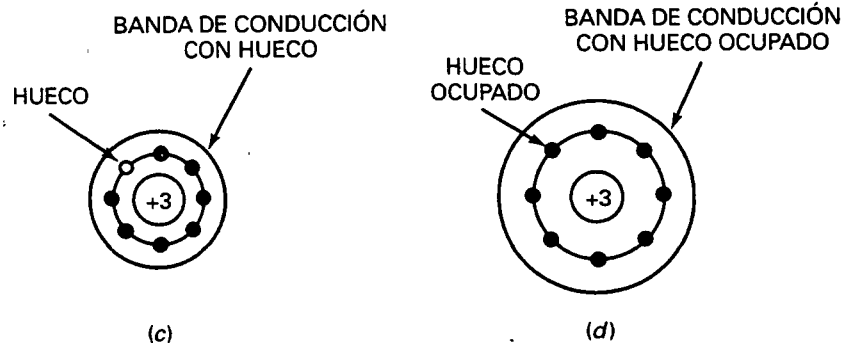


Figura 2-25. La difusión modifica las bandas de energía. *a)* Bandas de energía antes de la difusión; *b)* bandas de energía después de formarse la zona de deplexión; *c)* el átomo tipo *p* tiene una orbital menor antes de la difusión; *d)* el átomo tipo *p* tiene una orbital más grande después de la difusión, equivalente a un nivel de energía mayor.



tienen la suficiente energía para atravesar la unión. Para un electrón que trate de difundirse a través de la unión, la trayectoria que debe recorrer presenta una barrera de energía (Fig. 2-25*b*). El electrón no puede atravesar esta barrera a menos que reciba energía de una fuente de alimentación externa. (Esta fuente de energía puede ser una fuente de tensión, pero también puede ser calor, luz o otra radiación.)

□ Polarización directa

Mediante la polarización directa se logra que disminuya la barrera de energía (Fig. 2-26). En otras palabras, la batería aumenta el nivel energético de los electrones libres, lo que equivale a empujar la banda *n* hacia arriba. Debido a esto, los electrones libres adquieren la energía suficiente para entrar en la zona *p*. Exactamente después de entrar en dicha zona, cada electrón cae en un hueco (trayectoria A). Como electrón de valencia, continúa su viaje hacia la izquierda del cristal, lo que equivale a que los huecos se muevan hacia la unión.

Algunos huecos penetran en la región *n* como se muestra en la Figura 2-26. En este caso, los electrones de la banda de conducción pueden seguir la trayectoria de recombinación B. Independientemente de dónde se

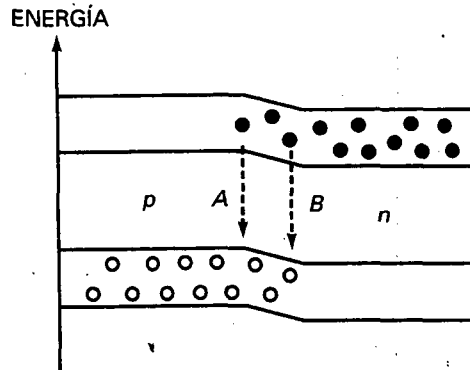


Figura 2-26. La polarización directa proporciona más energía a los electrones libres, equivalente a un nivel de energía mayor.

lleve a cabo esta recombinación, el resultado es el mismo. Un flujo estable de electrones libres se mueve hacia la unión y cae en los huecos cercanos a ella. Los electrones así capturados (ahora electrones de valencia) se mueven hacia la izquierda en un flujo continuo mediante los huecos de la región *p*. Se produce así una corriente continua de electrones a través del diodo.

Cuando los electrones libres caen de la banda de conducción a la de valencia irradian su exceso de energía en forma de calor y luz. En un diodo normal la radiación es energía calorífica, la cual no se puede aprovechar. Pero con un diodo emisor de luz (LED), la radiación es una luz de color rojo, verde, azul o naranja. Los diodos LED se emplean mucho como indicadores visuales en instrumentos electrónicos, teclados de ordenador y electrónica de consumo.

2-14. LA BARRERA DE POTENCIAL Y LA TEMPERATURA

La **temperatura de la unión** es la *temperatura dentro del diodo, exactamente en la unión pn*. La temperatura ambiente es diferente. Es la temperatura del aire fuera del diodo, el aire circundante al diodo. Cuando el diodo está conduciendo, la temperatura de la unión es más alta que la temperatura ambiente a causa del calor creado en la recombinación.

La barrera de potencial depende de la temperatura en la unión. Un incremento en la temperatura de la unión crea más electrones libres y huecos en las regiones dopadas. Como estas cargas se difunden en la zona de depleción, ésta se estrecha, lo que significa que *hay menos barrera de potencial a temperaturas altas de la unión*.

Antes de continuar necesitamos definir un símbolo:

$$\Delta = \text{el cambio en} \quad (2-2)$$

La letra griega Δ (delta) significa aquí «el cambio en». Por ejemplo, ΔV significa el cambio en la tensión, y ΔT significa el cambio en la temperatura.

La relación $\Delta V/\Delta T$ representa el cambio en la tensión dividido por el cambio en la temperatura.

Ahora podemos establecer una regla para estimar el cambio en la barrera de potencial: *la barrera de potencial de un diodo de silicio decrece 2 mV por cada incremento de 1 grado Celsius.*

Como una derivación:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2 \text{ mV/}^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

Reordenando:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T \quad (2-4)$$

Con esto podemos calcular la barrera de potencial a cualquier temperatura de la unión.

EJEMPLO 2-5

Suponiendo una barrera de potencial de 0,7 V a una temperatura ambiente de 25 °C, ¿cuál es la barrera de potencial en un diodo de silicio cuando la temperatura de la unión es de 100 °C? ¿Y si es de 0 °C?

SOLUCIÓN

Cuando la temperatura de la unión es 100 °C, el cambio en la barrera de potencial es:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C})(100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = -150 \text{ mV}$$

Esto nos dice que la barrera de potencial decrece 150 mV desde su valor a temperatura ambiente. Así, queda igual a:

$$V_B = 0,7 \text{ V} - 0,15 \text{ V} = 0,55 \text{ V}$$

Cuando la temperatura de la unión es 0 °C, el cambio en la barrera de potencial vale:

$$\Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C})(0^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 50 \text{ mV}$$

lo que quiere decir que la barrera de potencial crece 50 mV desde su valor a temperatura ambiente. Así, queda igual a:

$$V_B = 0,7 \text{ V} + 0,05 \text{ V} = 0,75 \text{ V}$$

2-15. DIODO CON POLARIZACIÓN INVERSA

A continuación se expondrán algunas ideas avanzadas acerca de los diodos polarizados en inversa. En principio, sabemos que la zona de deplexión modifica su anchura cuando la tensión inversa cambia. Veamos qué consecuencias trae consigo este hecho.

❑ Corriente transitoria

Cuando la tensión inversa aumenta, los electrones y los huecos se apartan de la unión. A medida que esto sucede, van quedando atrás iones positivos y negativos; en consecuencia, la zona de deplexión se ensancha. Según aumenta la tensión inversa, la zona de deplexión se hace más ancha. Mientras la zona de deplexión se ajusta a su nueva anchura, en el circuito externo circula una corriente. Esta corriente transitoria vuelve a ser cero después de que la zona de deplexión ha dejado de crecer.

El tiempo durante el que circula la corriente transitoria depende de la constante de tiempo (RC) del circuito externo. Casi siempre sucede en cuestión de nanosegundos. Por ello, pueden ignorarse los efectos de la corriente transitoria para frecuencias de trabajo por debajo de los 10 MHz, aproximadamente.

❑ Corriente inversa de saturación

Como se explicó anteriormente, la polarización directa de un diodo eleva la banda n y permite a los electrones libres traspasar la unión. La polarización inversa tiene el efecto contrario: amplía la zona de deplexión y hace descender la banda n , como se representa en la Figura 2-27.

Esta figura muestra la corriente inversa de saturación en función de las bandas de energía. Supóngase que aparece un par electrón-hueco en el área de la unión A y B . El electrón libre en A desciende por la barrera de energía empujando hacia fuera un electrón del extremo derecho de la banda de conducción. De manera similar, un electrón de valencia desciende por la barrera hacia el hueco en B . El electrón de valencia que cae deja un hueco. Este hueco de más en el lado p permite que entre un electrón al extremo izquierdo del cristal.

Cuanto mayor es la temperatura en la unión, mayor es la corriente inversa de saturación. Una aproximación útil que debe recordarse es la siguiente: I_s se duplica por cada aumento de 10°C de la temperatura, que se puede expresar como:

$$\text{Porcentaje } \Delta I_s = 100\% \text{ para un incremento de } 10^\circ\text{C} \quad (2-5)$$

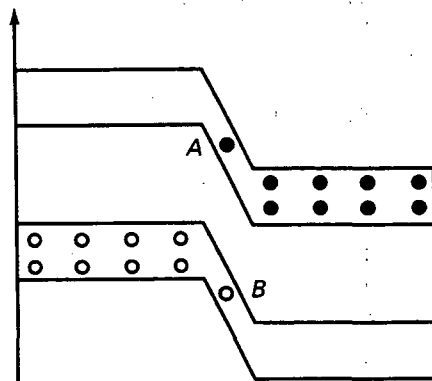


Figura 2-27. La energía térmica produce electrones libres y huecos en la deplexión.

Por tanto, el cambio en la corriente de saturación es del 100 por 100 por cada aumento de 10 °C en la temperatura. Si los cambios en la temperatura son menores que 10 °C, utilizamos esta regla equivalente:

$$\text{Porcentaje } \Delta I_s = 7 \% \text{ por } ^\circ\text{C} \quad (2-6)$$

Es decir, la variación de la corriente de saturación es de 7 por 100 por cada grado Celsius, solución que es una buena aproximación de la regla de los 10°.

□ Silicio frente a germanio

En un átomo de silicio la *distancia entre la banda de valencia y la banda de conducción* se denomina **gap de energía**. Cuando la energía térmica produce electrones libres y huecos, se debe dar a los electrones de valencia suficiente energía para saltar a la banda de conducción. A mayor gap de energía más dificultad para que la energía térmica produzca pares electrón-hueco. Afortunadamente, el silicio tiene un mayor gap de energía; esto significa que la energía térmica no produce muchos pares electrón-hueco a temperaturas normales.

En un átomo de germanio la banda de valencia está mucho más cerca de la banda de conducción. En otras palabras, el germanio tiene un gap de energía mucho menor que el silicio. Por esta razón, la energía térmica produce muchos más pares electrón-hueco en los dispositivos de germanio. Éste es el problema mencionado anteriormente. La excesiva corriente inversa de los dispositivos de germanio los excluye de su uso generalizado en ordenadores modernos, electrónica de consumo y circuitos de comunicaciones.

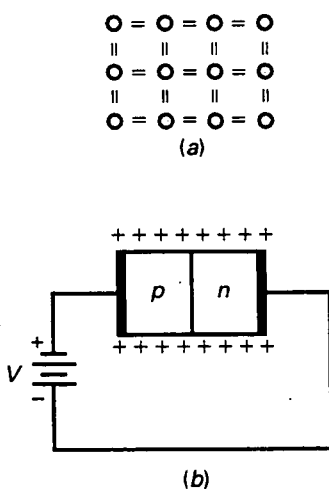


Figura 2-28. a) Los átomos en la superficie de un cristal no tienen vecinos; b) la superficie del cristal tiene huecos.

□ Corriente superficial de fugas

Se habló brevemente de la corriente superficial de fugas en el Apartado 2-10. Recuerde qué es una corriente inversa sobre la superficie del cristal. He aquí una explicación simplificada de la existencia de una corriente superficial de fugas. Supóngase que los átomos en los extremos superior e inferior en la Figura 2-28a son átomos de la superficie del cristal. Como estos átomos no tienen vecinos, tienen sólo 6 electrones en la orbital de valencia, lo que implica 2 huecos en cada átomo de la superficie. Puesto que estos huecos se hallan a lo largo de la superficie del cristal, mostrado en la Figura 2-28b, esta superficie es como un semiconductor tipo *p*. Debido a ello, pueden entrar electrones por el extremo izquierdo del cristal, viajar por los huecos de la superficie y salir por el extremo derecho del cristal. De esta manera se produce una pequeña corriente inversa a lo largo de la superficie.

La corriente superficial de fugas es directamente proporcional a la tensión inversa. Por ejemplo, si se duplica la tensión inversa, la corriente superficial de fugas I_{SL} se duplica. Podemos definir la resistencia superficial de fugas como:

$$R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}} \quad (2-7)$$

EJEMPLO 2-6

Un diodo de silicio tiene una corriente inversa de saturación de 5 nA a 25 °C. ¿Cuál es la corriente de saturación a 100 °C?

SOLUCIÓN

El cambio en la temperatura es:

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

Según la Ecuación (2-5), la corriente se dobla siete veces entre 5 °C y 95 °C:

$$I_s = (2^7)(5 \text{ nA}) = 640 \text{ nA}$$

y tomando como referencia la Ecuación (2-6), hay 5° adicionales entre 95 °C y 100 °C:

$$I_s = (1.07^5)(640 \text{ nA}) = 898 \text{ nA}$$

EJEMPLO 2-7

Si la corriente superficial de fugas es 2 nA para una tensión inversa de 25 V, ¿qué valor toma la corriente superficial de fugas para una tensión inversa de 35 V?

SOLUCIÓN

Hay dos formas de resolver este problema. Primero, calcular la resistencia superficial de fugas:

$$R_{st} = \frac{25 \text{ V}}{2 \text{ nA}} = 12.5(10^9) \Omega$$

Después, calcular la corriente superficial de fugas a 35 V como sigue:

$$I_{st} = \frac{35 \text{ V}}{12.5(10^9) \Omega} = 2.8 \text{ nA}$$

El segundo método sería así. Como la corriente superficial de fugas es directamente proporcional a la tensión inversa:

$$I_{st} = \frac{35 \text{ V}}{25 \text{ V}} 2 \text{ nA} = 2.8 \text{ nA}$$

AYUDAS AL ESTUDIO

RESUMEN**Sección 2-1. Conductores**

Un átomo de cobre neutro tiene solamente un electrón en su orbital exterior. Como este único electrón puede desligarse fácilmente de su átomo, se le da el nombre de electrón libre. El cobre es un buen conductor porque incluso la tensión más pequeña hace que los electrones libres fluyan de un átomo al siguiente.

Sección 2-2. Semiconductores

El silicio es el material semiconductor más utilizado. El átomo de silicio aislado tiene 4 electrones en su orbital exterior o de valencia. El número de electrones en el orbital de valencia es la clave de la conductividad. Los conductores tienen un electrón de valencia, los semiconductores 4 y los aislantes poseen 8.

Sección 2-3. Cristales de silicio

Cada átomo de silicio en un cristal tiene sus 4 electrones de valencia más cuatro electrones compartidos con los átomos vecinos. A temperatura ambiente, un cristal puro de silicio tiene sólo unos pocos electrones libres y huecos producidos térmicamente. El tiempo que transcurre entre la creación y la recombinación de un electrón libre con un hueco recibe el nombre de tiempo de vida.

Sección 2-4. Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor intrínseco es un semiconductor puro. Cuando se aplica una tensión externa al semiconductor intrínseco, los electrones libres se dirigen hacia el terminal positivo de la batería y los huecos se mueven hacia el negativo.

Sección 2-5. Dos tipos de flujos

En un semiconductor intrínseco existen dos tipos de portadores. En primer lugar está el flujo de los electrones libres a través de las orbitales grandes (banda de conducción). En segundo lugar está el flujo de los huecos a través de orbitales más pequeñas (banda de valencia).

Sección 2-6. Dopaje de un semiconductor

El dopaje aumenta la conductividad de un semiconductor. A un semiconductor dopado se le llama *semiconductor extrínseco*. Cuando un semiconductor intrínseco se dopa con átomos pentavalentes (donadores) tiene más electrones libres que huecos. Si un semiconductor

intrínseco se dopa con átomos trivalentes (aceptadores) tiene más huecos que electrones libres.

Sección 2-7. Dos tipos de semiconductores extrínsecos

En un semiconductor tipo *n* los electrones libres son los portadores mayoritarios y los huecos son los portadores minoritarios. En un semiconductor tipo *p*, por el contrario, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los portadores minoritarios.

Sección 2-8. El diodo no polarizado

Un diodo no polarizado tiene una zona de depleción en la unión *pn*. Los iones en esta zona de depleción producen una barrera de potencial. A temperatura ambiente, esta barrera de potencial es aproximadamente de 0,7 V para un diodo de silicio y 0,3 V para un diodo de germanio.

Sección 2-9. Polarización directa

Cuando una tensión externa se opone a la barrera de potencial, el diodo está polarizado en directa. Si la tensión aplicada es mayor que la barrera de potencial, la corriente es grande. Es decir, la corriente circula con facilidad en un diodo polarizado en directa.

Sección 2-10. Polarización inversa

Cuando una tensión externa refuerza la barrera de potencial, el diodo está polarizado en inversa. La anchura de la zona de depleción aumenta al incrementarse la tensión inversa. La corriente es aproximadamente cero.

Sección 2-11. Ruptura

Una tensión inversa demasiado grande producirá el efecto Zener o de avalancha. Así pues, una gran corriente de ruptura destruirá el diodo. En general, los diodos no deben trabajar en la zona de ruptura. La única excepción es el diodo Zener, un diodo de propósito específico, que se estudiará en un capítulo posterior.

Sección 2-12. Niveles de energía

Cuanto mayor es el orbital, mayor es el nivel de energía de un electrón. Si una fuerza externa eleva un electrón a un nivel de energía superior, el electrón emitirá energía cuando regresa a su orbital original.

Sección 2-13. La barrera de energía

La barrera de potencial de un diodo parece una barrera de energía. Los electrones que intentan atravesar la unión necesitan tener suficiente energía para escalar esta barrera. Una fuente de tensión externa que polariza el diodo en directa da a los electrones la energía suficiente para pasar a través de la zona de deplexión.

Sección 2-14. Barrera de potencial y temperatura

Cuando la temperatura de la unión se incrementa, la zona de deplexión se hace más estrecha y la barrera de potencial decrece. Decrecerá aproximadamente 2 mV por cada grado Celsius de incremento de temperatura.

Sección 2-15. Diodo polarizado en inversa

Hay tres componentes en la corriente inversa de un diodo. Primera, la corriente transitoria que ocurre cuando la tensión inversa cambia. Segunda, la corriente de portadores minoritarios, también llamada *corriente de saturación* porque es independiente de la

tensión inversa. Tercera, la corriente superficial de fugas. Se incrementa cuando crece la tensión inversa.

DEFINICIONES

(2-2) Δ = el cambio en

$$(2-7) R_{SL} = \frac{V_R}{I_{SL}}$$

LEYES

(2-1) Saturación de valencia: $n = 8$

DERIVACIONES

$$(2-3) \frac{\Delta V}{\Delta T} = -2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

$$(2-4) \Delta V = (-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}) \Delta T$$

(2-5) Porcentaje $\Delta I_S = 100\%$ para un incremento de 10°C

(2-6) Porcentaje $\Delta I_S = 7\%$ por $^\circ\text{C}$

CUESTIONES

- ¿Cuántos protones contiene el núcleo de un átomo de cobre?
 - 1
 - 4
 - 18
 - 29
- La carga resultante de un átomo neutro de cobre es
 - 0
 - +1
 - 1
 - +4
- Si a un átomo de cobre se le extrae su electrón de valencia, la carga resultante vale
 - 0
 - +1
 - 1
 - +4
- La atracción que experimenta hacia el núcleo el electrón de valencia de un átomo de cobre es
 - Ninguna
 - Débil
 - Fuerte
 - Imposible de describir
- ¿Cuántos electrones de valencia tiene un átomo de silicio?
 - 0
 - 1
 - 2
 - 4
- El semiconductor más empleado es
 - Cobre
 - Germanio
 - Silicio
 - Ninguno de los anteriores
- ¿Qué número de protones posee un átomo de silicio?
 - 4
 - 14
 - 29
 - 32
- Los átomos de silicio se combinan en una estructura ordenada que recibe el nombre de
 - Enlace covalente
 - Cristal
 - Semiconductor
 - Orbital de valencia
- Un semiconductor intrínseco presenta algunos huecos a temperatura ambiente causados por
 - El dopaje
 - Electrones libres
 - Energía térmica
 - Electrones de valencia
- Cada electrón de valencia en un semiconductor intrínseco establece un
 - Enlace covalente
 - Electrón libre
 - Hueco
 - Recombinación.
- La unión de un electrón libre con un hueco recibe el nombre de
 - Enlace covalente
 - Tiempo de vida
 - Recombinación
 - Energía térmica

62 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

12. A temperatura ambiente un cristal de silicio intrínseco se comporta como
 - a) Una batería
 - b) Un conductor
 - c) Un aislante
 - d) Un hilo de cobre
13. El tiempo que transcurre entre la creación de un hueco y su desaparición se conoce como
 - a) Dopaje
 - b) Tiempo de vida
 - c) Recombinación
 - d) Valencia
14. Al electrón de valencia de un conductor se le denomina también por
 - a) Electrón ligado
 - b) Electrón libre
 - c) Núcleo
 - d) Protón
15. ¿Cuántos tipos de flujo de portadores presenta un conductor?
 - a) 1
 - b) 2
 - c) 3
 - d) 4
16. ¿Cuántos tipos de flujo de portadores presenta un semiconductor?
 - a) 1
 - b) 2
 - c) 3
 - d) 4
17. Cuando se aplica una tensión a un semiconductor, los huecos circulan
 - a) Distanciándose del potencial negativo
 - b) Hacia el potencial positivo
 - c) En el circuito externo
 - d) Ninguna de las anteriores
18. ¿Cuántos huecos presenta un conductor?
 - a) Muchos
 - b) Ninguno
 - c) Sólo los producidos por la energía térmica
 - d) El mismo número que de electrones libres
19. En un semiconductor intrínseco, el número de electrones libres es
 - a) Igual al número de huecos
 - b) Mayor que el número de huecos
 - c) Menor que el número de huecos
 - d) Ninguna de las anteriores
20. La temperatura de cero absoluto es igual a
 - a) -273°C
 - b) 0°C
 - c) 25°C
 - d) 50°C
21. A la temperatura de cero absoluto un semiconductor intrínseco presenta
 - a) Pocos electrones libres
 - b) Muchos huecos
 - c) Muchos electrones libres
 - d) Ni huecos ni electrones libres
22. A temperatura ambiente un semiconductor intrínseco tiene
 - a) Algunos electrones libres y huecos
 - b) Muchos huecos
 - c) Muchos electrones libres
 - d) Ningún hueco
23. El número de electrones libres y de huecos en un semiconductor intrínseco aumenta cuando la temperatura
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) Se mantiene constante
 - d) Ninguna de las anteriores
24. El flujo de electrones de valencia hacia la izquierda significa que los huecos circulan hacia
 - a) La izquierda
 - b) La derecha
 - c) En cualquier dirección
 - d) Ninguna de las anteriores
25. Los huecos se comportan como
 - a) Átomos
 - b) Cristales
 - c) Cargas negativas
 - d) Cargas positivas
26. ¿Cuántos electrones de valencia tienen los átomos trivalentes?
 - a) 1
 - b) 3
 - c) 4
 - d) 5
27. ¿Qué número de electrones de valencia tiene un átomo donador?
 - a) 1
 - b) 3
 - c) 4
 - d) 5
28. Si quisiera producir un semiconductor tipo *p*, ¿qué emplearía?
 - a) Átomos aceptadores
 - b) Átomos donadores
 - c) Impurezas pentavalentes
 - d) Silicio
29. Los huecos son minoritarios en un semiconductor tipo
 - a) Extrínseco
 - b) Intrínseco
 - c) Tipo *n*
 - d) Tipo *p*
30. ¿Cuántos electrones libres contiene un semiconductor tipo *p*?
 - a) Muchos
 - b) Ninguno
 - c) Sólo los producidos por la energía térmica
 - d) El mismo número que de huecos
31. La plata es el mejor conductor. ¿Cuál es el número de electrones de valencia que tiene?
 - a) 1
 - b) 4
 - c) 18
 - d) 29
32. Si un semiconductor intrínseco tiene un billón de electrones libres a la temperatura ambiente, ¿cuántos presentará a la temperatura de 75°C ?
 - a) Menos de un billón
 - b) Un billón
 - c) Más de un billón
 - d) Imposible de contestar
33. Una fuente de tensión es aplicada a un semiconductor tipo *p*. Si el extremo izquierdo del cristal es positivo, ¿en qué sentido circularán los portadores mayoritarios?
 - a) Hacia la izquierda
 - b) Hacia la derecha
 - c) En ninguna dirección
 - d) Imposible de contestar

34. ¿Cuál de los siguientes conceptos está menos relacionado con los otros tres?
- Conductor
 - Semiconductor
 - Cuatro electrones de valencia
 - Estructura cristalina
35. ¿Cuál de las siguientes temperaturas es aproximadamente igual a la temperatura ambiente?
- 0 °C
 - 25 °C
 - 50 °C
 - 75 °C
36. ¿Cuántos electrones hay en la orbital de valencia de un átomo de silicio dentro de un cristal?
- 1
 - 4
 - 8
 - 14
37. Los iones positivos son átomos que
- Han ganado un protón
 - Han perdido un protón
 - Han ganado un electrón
 - Han perdido un electrón
38. ¿Cuál de los siguientes conceptos describe un semiconductor tipo *n*?
- Neutro
 - Cargado positivamente
 - Cargado negativamente
 - Tiene muchos huecos
39. Un semiconductor tipo *p* contiene huecos y
- Iones positivos
 - Iones negativos
 - Átomos pentavalentes
 - Átomos donadores
40. ¿Cuál de los siguientes conceptos describe un semiconductor tipo *p*?
- Neutro
 - Cargado positivamente
 - Cargado negativamente
 - Tiene muchos electrones libres
41. ¿Cuál de los siguientes elementos no se puede mover?
- Huecos
 - Electrones libres
 - Iones
 - Portadores mayoritarios
42. ¿A qué se debe la zona de deplexión?
- Al dopaje
 - A la recombinación
 - A la barrera de potencial
 - A los iones
43. La barrera de potencial de un diodo de silicio a temperatura ambiente es de
- 0,3 V
 - 0,7 V
 - 1 V
 - 2 mV por °C
44. Para producir una gran corriente en un diodo de silicio polarizado en directa, la tensión aplicada debe superar
- 0 V
 - 0,3 V
 - 0,7 V
 - 1 V
45. En un diodo de silicio la corriente inversa es normalmente
- Muy pequeña
 - Muy grande
 - Cero
 - En la región de ruptura
46. La corriente superficial de fugas es parte de
- La corriente de polarización directa
 - La corriente de ruptura en polarización directa
 - La corriente inversa
 - La corriente de ruptura en polarización inversa
47. La tensión que provoca el fenómeno de avalancha es
- La barrera de potencial
 - La zona de deplexión
 - La tensión de codo
 - La tensión de ruptura
48. La difusión de electrones libres a través de la unión de un diodo produce
- Polarización directa
 - Polarización inversa
 - Ruptura
 - La zona de deplexión
49. Cuando la tensión inversa crece de 5 V a 10 V, la zona de deplexión
- Se reduce
 - Crece
 - No le ocurre nada
 - Se rompe
50. Cuando un diodo es polarizado en directa, la recombinación de electrones libres y huecos puede producir
- Calor
 - Luz
 - Radiación
 - Todas las anteriores
51. Si aplicamos una tensión inversa de 20 V a un diodo, la tensión en la zona de deplexión será de
- 0 V
 - 0,7 V
 - 20 V
 - Ninguna de las anteriores
52. Cada grado de aumento de temperatura en la unión decrece la barrera de potencial en
- 1 mV
 - 2 mV
 - 4 mV
 - 10 mV
53. La corriente inversa de saturación se duplica cuando la temperatura de la unión se incrementa
- 1 °C
 - 2 °C
 - 4 °C
 - 10 °C
54. La corriente superficial de fugas se duplica cuando la tensión inversa aumenta
- 7 por 100
 - 100 por 100
 - 200 por 100
 - 2 mV

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

Un equipo de expertos en electrónica crearon estas preguntas. En la mayoría de los casos el texto proporciona información suficiente para responder a todas las preguntas. Ocasionalmente usted puede encontrarse con algún término que no le es familiar. Si esto sucede, busque el término en el diccionario técnico. Además, puede aparecer alguna pregunta no cubierta en este libro. En este caso, investigue en alguna biblioteca o consulte las respuestas al final del libro.

1. Dígame por qué el cobre es un buen conductor de electricidad.
2. ¿En qué difiere un semiconductor de un conductor? Incluya dibujos en su explicación.
3. Dígame todo lo que sepa acerca de los huecos y cómo se diferencian de los electrones libres. Incluya algunos dibujos.
4. Deme la idea básica de semiconductores dopados. Quiero ver algunos dibujos que justifiquen su explicación.
5. Demuéstreme, dibujando y explicando la acción, por qué existe corriente en un diodo polarizado en directa.
6. Dígame por qué existe una corriente muy pequeña en un diodo polarizado en inversa.
7. Un diodo semiconductor polarizado en inversa se romperá bajo ciertas condiciones. Quiero que describa la avalancha con suficiente detalle para que yo pueda entenderlo.
8. Quiero saber por qué un diodo emisor de luz produce luz. Hábleme sobre ello.
9. ¿Los huecos circulan en un conductor? ¿Por qué o por qué no? ¿Qué le sucede a los huecos cuando alcanzan el final de un semiconductor?
10. ¿Qué es la corriente superficial de fugas?
11. ¿Por qué es importante la recombinación en un diodo?
12. ¿En qué se diferencian el silicio extrínseco del intrínseco? ¿Por qué es importante la diferencia?
13. En sus propias palabras describa lo que sucede cuando se origina la unión *pn*. Su argumento debería incluir la información sobre la *zona de deplexión*.
14. En la unión *pn* de un diodo, ¿cuáles son las cargas portadoras que se mueven, huecos o electrones libres?

PROBLEMAS

- 2-1. ¿Cuál es la carga neta de un átomo de cobre si gana tres electrones?
- 2-2. ¿Cuánto vale la carga neta de un átomo de silicio si pierde todos sus electrones de valencia?
- 2-3. Clasifique cada uno de los siguientes como un conductor o semiconductor:
a) Germanio c) Silicio
b) Plata d) Oro
- 2-4. Un diodo está polarizado en directa. Si la corriente es 5 mA a través del lado *n*, ¿cuál es la carga a través de cada uno de los siguientes:
a) Lado *p*
b) Cables de conexión externos
c) Unión
- 2-5. Clasifique cada uno de los siguientes como un semiconductor tipo *n* o tipo *p*:
a) Dopado por un átomo aceptador
b) Cristal con impurezas pentavalentes
c) Los portadores mayoritarios son huecos
d) Se añadieron átomos donadores al cristal
e) Los portadores minoritarios son electrones
- 2-6. Un diseñador debe utilizar un diodo de silicio entre las temperaturas de 0 °C a 75 °C. ¿Cuáles serán los valores mínimo y máximo de la barrera de potencial?
- 2-7. Un diodo de silicio tiene una corriente de saturación de 10 nA a 25 °C. Si debe funcionar en el rango de 0 °C a 75 °C, ¿cuáles serán los valores máximos y mínimos de la corriente de saturación?
- 2-8. Un diodo presenta una corriente superficial de fugas a 10 nA cuando su tensión inversa es de 10 V. ¿Cuál será su corriente superficial de fugas si la tensión inversa crece hasta 50 V?

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 2-9. Un diodo de silicio tiene una corriente inversa de 5 μ A a 25 °C y 100 μ A a 100 °C. ¿Cuáles son los valores de la corriente de saturación y la corriente superficial de fugas a 25 °C?
- 2-10. Los dispositivos con uniones *pn* se utilizan para fabricar ordenadores. La velocidad de un ordenador depende de lo rápido que se pueda «encender» y «apagar» un diodo. Basándose en lo que ha aprendido sobre polarización inversa, ¿qué puede hacer para acelerar un ordenador?

Teoría de los diodos

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Dibujar el símbolo de un diodo diferenciando el ánodo del cátodo.
- Trazar la curva característica del diodo, describiendo todas las partes y puntos más significativos.
- Describir el diodo ideal.
- Explicar la segunda aproximación.
- Enunciar la tercera aproximación.
- Encontrar los cuatro parámetros característicos de un diodo estudiando su hoja de características.

VOCABULARIO

- | | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|
| • análisis de variables dependientes | • dispositivo lineal | • recta de carga |
| • ánodo | • dispositivo no lineal | • resistencia interna |
| • cátodo | • limitación de potencia | • resistencia óhmica |
| • diodo | • máxima corriente en polarización directa | • tensión umbral |
| • diodo ideal | | |

Este capítulo prolonga nuestro estudio acerca de los diodos. Después de exponer la curva del diodo, nos centraremos en las aproximaciones de un diodo. Necesitamos dichas aproximaciones porque el análisis exacto es muy tedioso y largo en la mayoría de las situaciones. Por ejemplo, si se van a detectar averías normalmente la aproximación ideal es la adecuada, y una segunda aproximación proporciona soluciones rápidas y fáciles en muchos casos. Apuntando un poco más lejos, podemos usar una tercera aproximación para obtener mayor precisión, o una solución de ordenador para casi todas las respuestas.

3-1. IDEAS BÁSICAS

Una resistencia ordinaria es un **dispositivo lineal** porque *la gráfica de su corriente en función de su tensión es una línea recta*. Un diodo es diferente. Es un dispositivo no lineal porque la gráfica de la corriente en función de la tensión no es una línea recta. La razón es la barrera de potencial: cuando la tensión del diodo es menor que la barrera de potencial, la corriente del diodo es pequeña; si la tensión del diodo supera esta barrera de potencial, la corriente del diodo se incrementa rápidamente.

□ El símbolo eléctrico

La Figura 3-1a representa el símbolo eléctrico de un diodo. El lado *p* se llama **ánodo** y el lado *n* es el **cátodo**. El símbolo del diodo es una flecha que apunta del lado *p* al lado *n*, es decir, del ánodo al cátodo.

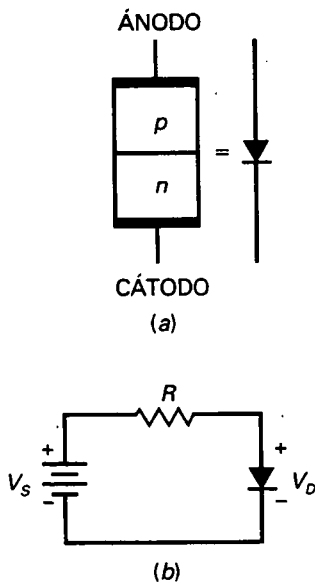


Figura 3-1. Diodo.
a) Símbolo eléctrico;
b) polarización directa.

□ Circuito básico del diodo

En la Figura 3-1b se muestra un circuito con un diodo. En este circuito el diodo está polarizado en directa. ¿Cómo lo sabemos? Porque el terminal positivo de la batería está conectado al lado p del diodo a través de una resistencia, y el terminal negativo está conectado al lado n . Con esta conexión, el circuito está tratando de empujar huecos y electrones libres hacia la unión.

En circuitos más complicados puede ser más difícil decir si el diodo está o no polarizado en directa. Para hacerlo nos podemos servir de la siguiente regla; preguntémonos lo siguiente: ¿está el circuito externo tratando de empujar los electrones libres en la dirección de circulación sencilla? En caso afirmativo, el diodo está polarizado en directa.

¿Cuál es la dirección de circulación sencilla? Si se está usando corriente convencional, la dirección sencilla es la misma que indica la flecha del diodo. Si se prefiere el flujo de electrones, la dirección sencilla es en el otro sentido.

Cuando el diodo forma parte de un circuito complicado podemos usar también el teorema de Thevenin para determinar si está polarizado en directa. Por ejemplo, se supone que se ha reducido un circuito complicado con el teorema de Thevenin para obtener la Figura 3-1b. En este caso se sabe que el diodo está polarizado en directa.

□ La zona directa

La Figura 3-1b es un circuito que puede montarse en el laboratorio. Tras conectarlo, es posible medir la tensión en el diodo y la corriente que lo atraviesa. También se puede invertir la polaridad de la fuente de tensión continua y medir la corriente y la tensión del diodo polarizado en inversa. Si se representa la corriente a través del diodo en función de la tensión del diodo, se obtendrá una gráfica parecida a la de la Figura 3-2.

Éste es un resumen visual de las ideas expuestas en el capítulo anterior. Por ejemplo, cuando el diodo está polarizado en directa no hay una corriente significativa hasta que la tensión en el diodo sea superior a la barrera de potencial. Por otro lado, cuando el diodo está polarizado en inversa, casi no hay corriente inversa hasta que la tensión del diodo alcanza la tensión de ruptura. Entonces, la avalancha produce una gran tensión inversa, destruyendo el diodo.

□ Tensión umbral

En la zona directa la *tensión a partir de la cual la corriente empieza a incrementarse rápidamente* se denomina **tensión umbral** del diodo, que es igual a la barrera de potencial. Los análisis de circuitos con diodos se dirigen normalmente a determinar si la tensión del diodo es mayor o menor que la tensión umbral. Si es mayor, el diodo conduce fácilmente; si es menor, lo hace con pobreza. Definimos la tensión umbral de un diodo de silicio de la siguiente forma:

$$V_k \approx 0,7 \text{ V} \quad (3-1)$$

(Nota: El símbolo \approx significa «aproximadamente igual a».)

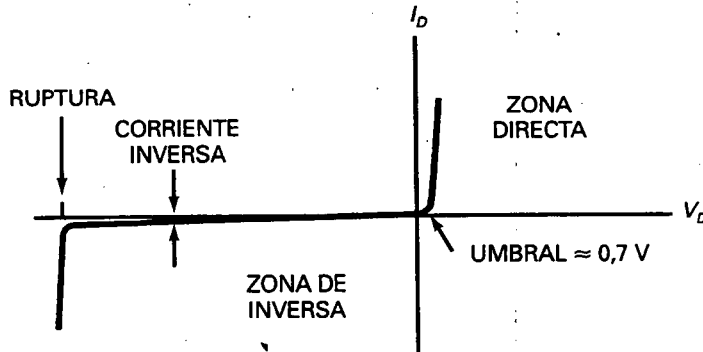


Figura 3-2. Curva del diodo.

Aunque los diodos de germanio raramente son utilizados en diseños nuevos, se pueden encontrar todavía diodos de este elemento en circuitos especiales o en equipos más antiguos. Por esta razón, conviene recordar que la tensión umbral de un diodo de germanio es aproximadamente 0,3 V. Esta tensión umbral más pequeña es una ventaja y obliga a considerar el uso de un diodo de estas características en ciertas aplicaciones.

□ Resistencia interna

Para tensiones mayores que la tensión umbral, la corriente del diodo crece rápidamente, lo que quiere decir que aumentos pequeños en la tensión del diodo originarán grandes incrementos en su corriente. La causa es la siguiente: después de superada la barrera de potencial, lo único que se opone a la corriente es la resistencia de las zonas *p* y *n*. En otras palabras, si las zonas *p* y *n* fueran dos piezas separadas de semiconductor, cada una tendría una resistencia que se podría medir con un óhmetro, igual que una resistencia ordinaria.

A la suma de estas resistencias óhmicas se le llama **resistencia interna** del diodo, y se define mediante la siguiente fórmula:

$$R_B = R_P + R_N \quad (3-2)$$

El valor de la resistencia interna es función del nivel de dopado y del tamaño de las zonas *p* y *n*. Normalmente, la resistencia interna de los diodos es menor que 1 Ω.

□ Máxima corriente continua con polarización directa

Si la corriente en un diodo es demasiado grande, el calor excesivo destruirá el diodo; por esta razón, la hoja de características que proporcionan los fabricantes especifica la corriente máxima que un diodo puede soportar sin peligro de acortar su vida o degradar sus propiedades.

La **corriente máxima con polarización directa** es una de las limitaciones dadas en una hoja de características. Esta corriente puede aparecer como

$I_{F(máx)}$, $I_{(máx)}$, I_O , etc., dependiendo del fabricante. Por ejemplo, un 1N456 tiene una corriente máxima de 135 mA. Este dato significa que puede conducir con seguridad una corriente continua con polarización directa igual a 135 mA.

□ Disipación de potencia

Se puede calcular la disipación de potencia de un diodo de la misma forma que se hace para una resistencia. Es igual al producto de la tensión del diodo y la corriente. Expresándolo matemáticamente:

$$P_D = V_D I_D \quad (3-3)$$

La **limitación de potencia** indica *cuánta potencia puede disipar el diodo sin peligro de acortar su vida ni degradar sus propiedades*. Expresada mediante una fórmula, la definición es:

$$P_{máx} = V_{máx} I_{máx} \quad (3-4)$$

donde $V_{máx}$ es la tensión correspondiente a $I_{máx}$. Por ejemplo, si un diodo tiene una tensión y corriente máximas de 1 V y 2 A, su limitación de potencia es 2 W.

EJEMPLO 3-1

¿El diodo de la Figura 3-3a está polarizado en directa o en inversa?

SOLUCIÓN

La tensión a través de R_2 es positiva; por tanto, el circuito está tratando de empujar la corriente en la dirección de circulación sencilla. Si esto no está claro, veamos el circuito de Thevenin con el diodo, como se muestra en la Figura 3-3b. En este circuito podemos apreciar que la fuente de tensión continua está tratando de empujar la corriente en la dirección de circulación sencilla. Por consiguiente, el diodo está polarizado en directa.

Siempre que tengamos dudas conviene reducir el circuito en estudio a un circuito en serie. Después será más fácil ver si la fuente de tensión está tratando de empujar la corriente en la dirección sencilla o no.

EJEMPLO 3-2

¿Se encuentran los diodos de la Figura 3-3c polarizados en directa o en inversa?

SOLUCIÓN

El diodo D_1 está polarizado en inversa porque el circuito está tratando de empujar la corriente en la dirección más difícil. Por otro

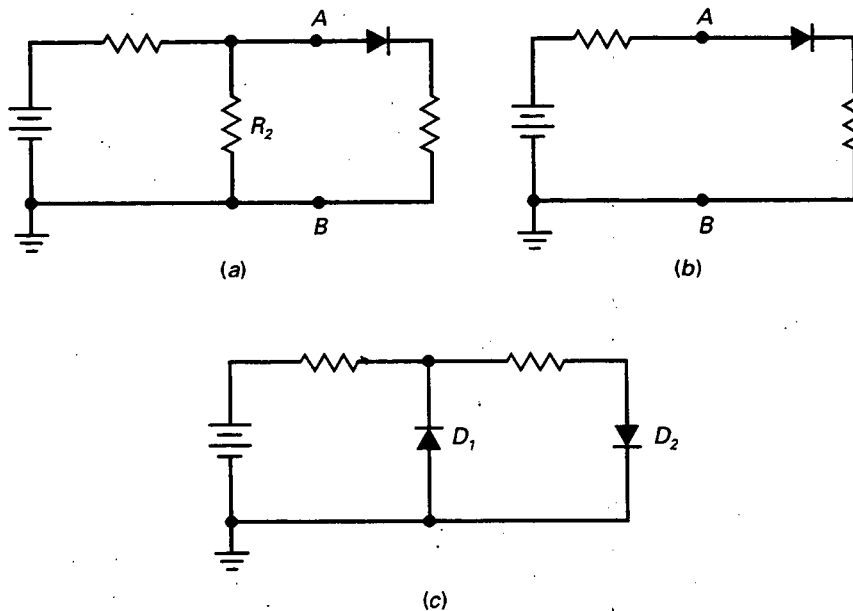


Figura 3-3

lado, el diodo D_2 lo está en directa, ya que el circuito está intentando empujar la corriente en la dirección sencilla.

EJEMPLO 3-3

Un diodo tiene una limitación de potencia de 5 W. Si la tensión del diodo es de 1.2 V y la corriente del diodo es 1.75 A, ¿cuál es la disipación de potencia? ¿Se destruirá el diodo?

SOLUCIÓN

$$P_D = (1.2 \text{ V})(1.75 \text{ A}) = 2.1 \text{ W}$$

El resultado es inferior a la limitación de potencia. Por tanto, el diodo no se destruirá.

3-2. EL DIODO IDEAL

La Figura 3-4 muestra el gráfico de la zona directa de un diodo con el programa EWB. Aquí se ve la corriente del diodo I_D en función de la tensión del diodo V_D . Nótese que la corriente es aproximadamente cero hasta que la tensión del diodo se acerca a la barrera de potencial. En las proximidades de 0,6 a 0,7 V, la corriente del diodo se incrementa. Cuando la tensión del

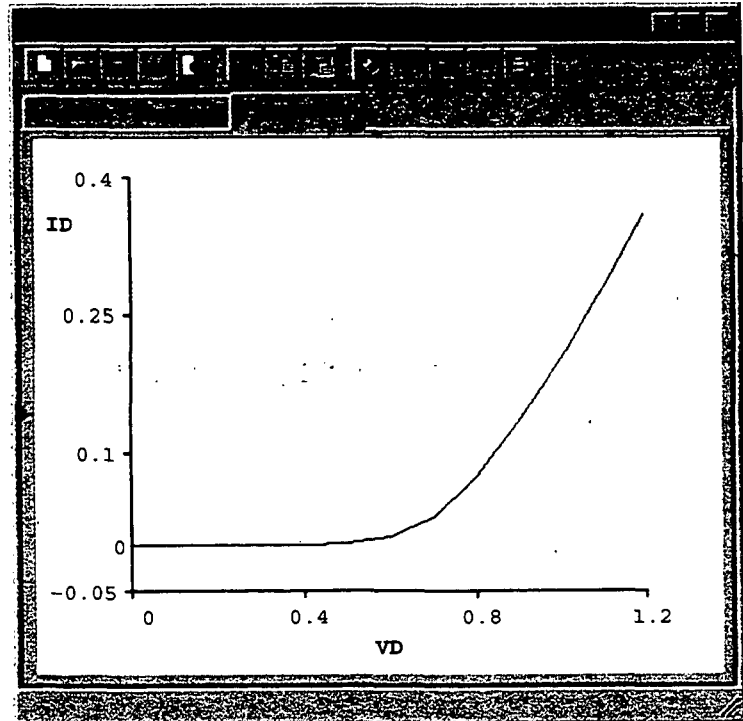


Figura 3-4. Gráfica del banco de pruebas de un diodo típico de silicio.

diodo es mayor de 0,8 V, la corriente del diodo es significativa y la gráfica es casi lineal.

Dependiendo del dopaje y del tamaño físico de un diodo, éste puede diferir de otros por su máxima corriente directa, limitación de potencia y otras características. Si necesitamos una solución exacta deberíamos usar la gráfica de un diodo particular. Aunque los puntos exactos de la corriente y de la tensión son diferentes de un diodo a otro, la gráfica de cualquier diodo es similar al de la Figura 3-4. Todos los diodos de silicio tienen una tensión umbral de aproximadamente 0,7 V.

La mayoría de las veces no necesitamos una solución exacta. Ésta es la razón para usar aproximaciones para un diodo. Comenzaremos con la aproximación más simple, llamada aproximación del *diodo ideal*. En líneas generales, ¿qué hace un diodo? Conduce bien en la dirección directa y conduce mal en la inversa. Teóricamente, un diodo rectificador se comporta como un conductor perfecto (resistencia cero) cuando tiene polarización directa, y lo hace como un aislante perfecto (resistencia infinita) cuando su polarización es inversa.

En la Figura 3-5a se ofrece la gráfica corriente-tensión de un diodo ideal. Refleja lo que se acaba de exponer: resistencia cero con polarización directa y resistencia infinita con polarización inversa. A decir verdad, es imposible construir un dispositivo con esas características, pero es lo que los fabricantes harían si pudiesen.

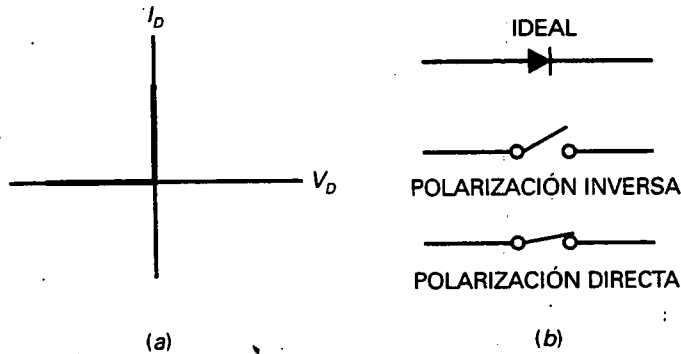


Figura 3-5. a) Curva del diodo ideal; b) un diodo ideal actúa como un interruptor.

¿Existe algún dispositivo real que actúe como un diodo ideal? Sí. Un interruptor tiene resistencia cero al estar cerrado, y resistencia infinita al estar abierto. Por tanto, un diodo ideal actúa como un interruptor que se cierra al tener polarización directa y se abre con polarización inversa. En la Figura 3-5b se resume esta idea del interruptor.

EJEMPLO 3-4

Calcular la corriente y la tensión en la carga, empleando la aproximación del diodo ideal, en el circuito representado en la Figura 3-6a.

SOLUCION

Como el diodo está polarizado en directa, es equivalente a un interruptor cerrado. Por tanto, consideramos el diodo como un interruptor cerrado. Después podemos ver que toda la tensión de la fuente aparece a través de la resistencia de carga:

$$V_L = 10 \text{ V}$$

Con la ley de Ohm, la corriente por la carga es:

$$I_L = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

EJEMPLO 3-5

Calcular la tensión en la carga y la corriente por la carga en la Figura 3-6b usando un diodo ideal.

SOLUCION

Una forma de resolver este problema consiste en aplicar el teorema de Thevenin a la izquierda del diodo. Mirando desde el diodo hacia la fuente, vemos un divisor de tensión con $6 \text{ k}\Omega$ y $3 \text{ k}\Omega$. La tensión de Thevenin es de 12 V y la resistencia de Thevenin es de

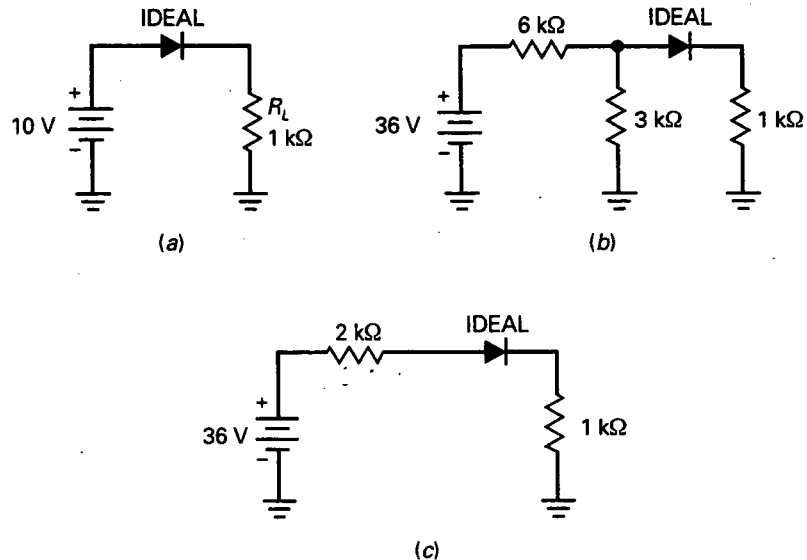


Figura 3-6

2 kΩ. La Figura 3-6c muestra el circuito de Thevenin conectado al diodo. (Si tiene algún problema en entender esto, revise el Ejemplo 1-4.)

Ahora que tenemos un circuito serie, podemos ver que el diodo está polarizado en directa. Por consiguiente, consideramos el diodo como un interruptor cerrado. Entonces el resto de los cálculos son los siguientes:

$$I_L = \frac{12\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 4\text{ mA}$$

y

$$V_L = (4\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = 4\text{ V}$$

No tiene que usar el teorema de Thevenin. Se puede analizar la Figura 3-6b visualizando el diodo como un interruptor cerrado. Entonces tiene 3 kΩ en paralelo con 1 kΩ, equivalente a 750 Ω. Usando la ley de Ohm, se puede calcular una caída de tensión de 32 V a través de 6 kΩ. El resto del análisis produce la misma tensión en la carga y la misma corriente por la carga.

3-3. LA SEGUNDA APROXIMACIÓN

La aproximación ideal es siempre correcta o cierta en la mayoría de las situaciones de detección de averías, pero no siempre estamos detectando averías. Algunas veces queremos un valor más exacto para la corriente y la tensión en la carga. Es entonces cuando tiene sentido la *segunda aproximación*.

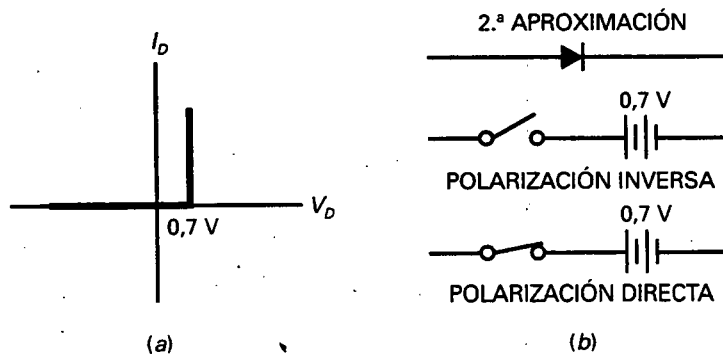


Figura 3-7. a) Curva del diodo para la segunda aproximación; b) circuito equivalente para la segunda aproximación.

La Figura 3-7a presenta el gráfico de la corriente en función de la tensión para la *segunda aproximación*. El dibujo indica que no hay corriente hasta que aparecen 0,7 V en el diodo. En este punto el diodo se activa. De ahí en adelante sólo aparecerán 0,7 V en el diodo, independientemente del valor de la corriente.

La Figura 3-7b muestra el circuito equivalente para la segunda aproximación de un diodo de silicio. El diodo se asemeja a un interruptor en serie con una barrera de potencial de 0,7 V. Si la tensión de Thevenin de la fuente es, por lo menos, de 0,7 V, el interruptor se cerrará. Cuando conduce, la tensión en el dispositivo será de 0,7 V para cualquier corriente directa. Por otro lado, cuando la tensión de Thevenin es menor que 0,7 V, el interruptor se abrirá. En este caso, no hay corriente a través del diodo.

EJEMPLO 3-6

Usar la segunda aproximación para calcular la corriente por la carga, la tensión en la carga y la potencia en el diodo en la Figura 3-8.

SOLUCIÓN

Como el diodo está polarizado en directa, es equivalente a una batería de 0,7 V, lo que significa que la tensión en la carga iguala a la tensión de la fuente menos la caída de tensión en el diodo:

$$V_L = 10 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 9,3 \text{ V}$$

Con la ley de Ohm, la corriente por la carga es:

$$I_L = \frac{9,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9,3 \text{ mA}$$

La potencia en el diodo vale:

$$P_D = (0,7 \text{ V})(9,3 \text{ mA}) = 6,51 \text{ mW}$$

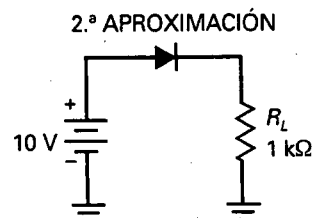


Figura 3-8

EJEMPLO 3-7

Calcular la tensión en la carga, la corriente por la carga y la potencia en el diodo en la Figura 3-9a empleando la segunda aproximación.

SOLUCIÓN

De nuevo, utilizamos el teorema de Thevenin para el circuito a la izquierda del diodo. Como antes, la tensión de Thevenin es 12 V y la resistencia de Thevenin es de 2 k Ω . La Figura 3-9b muestra el circuito simplificado.

Como la tensión en el diodo es 0,7 V, la tensión en la carga vale:

$$I_L = \frac{12\text{ V} - 0,7\text{ V}}{3\text{ k}\Omega} = 3,77\text{ mA}$$

La tensión en la carga es:

$$V_L = (3,77\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = 3,77\text{ V}$$

Y la potencia en el diodo es igual a:

$$P_D = (0,7\text{ V})(3,77\text{ mA}) = 2,64\text{ mW}$$

3-4. LA TERCERA APROXIMACIÓN

En la tercera aproximación de un diodo se incluye la resistencia interna R_B . La Figura 3-10 muestra el efecto que R_B tiene sobre la curva del diodo. Después de que el diodo de silicio comienza a conducir, la tensión aumenta lineal o proporcionalmente con los incrementos de la corriente. Cuanto mayor sea la corriente, mayor es la tensión, al tener que incluirse la caída de tensión en la resistencia interna a la tensión total del diodo.

El circuito equivalente para la tercera aproximación es un interruptor en serie con una barrera de potencial de 0,7 V y una resistencia R_B (Fig. 3-10b).

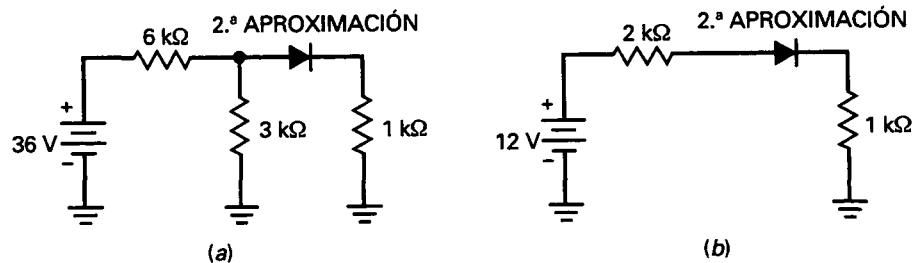


Figura 3-9. a) Circuito original; b) simplificado con el teorema de Thevenin.

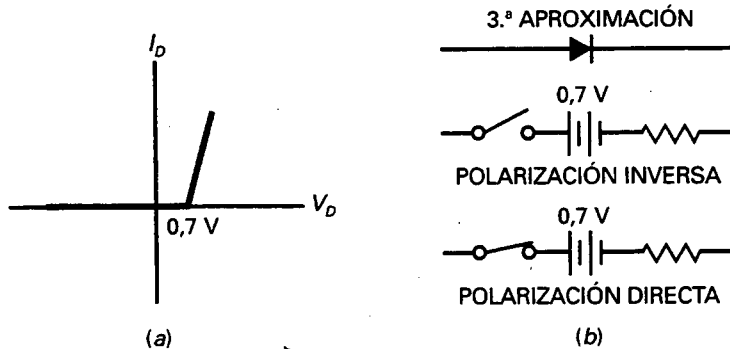


Figura 3-10. a) Curva del diodo para la tercera aproximación; b) circuito equivalente para la tercera aproximación.

Cuando la tensión aplicada es mayor que 0,7 V, el diodo conduce. La tensión total en el diodo es igual a:

$$V_D = 0,7 + I_D R_B \quad (3-5)$$

A menudo, la resistencia interna es menor que 1 Ω , y fácilmente la podemos ignorar en nuestros cálculos. Una regla útil para ignorar la resistencia interna es la siguiente definición:

$$\text{Ignore la resistencia si: } R_B < 0,01 R_{TH} \quad (3-6)$$

que dice que se ignore la resistencia interna cuando sea la centésima parte de la resistencia de Thevenin que ve el diodo. Si se satisface esta condición, el error es menor que el 1 por 100. La tercera aproximación se emplea raramente por técnicos porque los diseñadores de circuitos normalmente satisfacen la Ecuación (3-6).

EJEMPLO 3-8

El 1N4001 de la Figura 3-11a tiene una resistencia interna de 0,23 Ω . ¿Cuál es la tensión en la carga, la corriente por la carga y la potencia del diodo?

SOLUCIÓN

Sustituyendo el diodo por su tercera aproximación obtenemos la Figura 3-11b. La resistencia interna es suficientemente pequeña como para ignorarla porque es menor que 1/100 de la resistencia de carga. En este caso, podemos usar la segunda aproximación para resolver el problema. Ya hicimos esto en el Ejemplo 3-6, donde encontramos una tensión en la carga, una corriente por la carga y una potencia en el diodo de 9,3 V, 9,3 mA y 6,51 mW, respectivamente.

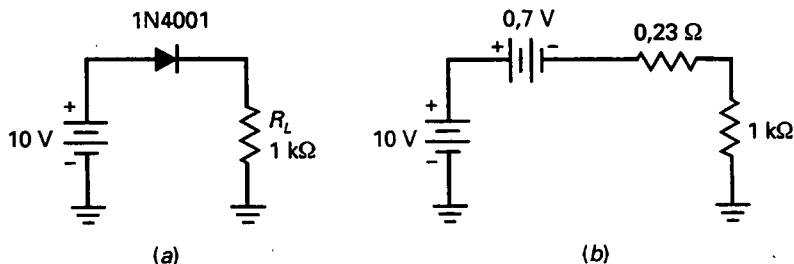


Figura 3-11

EJEMPLO 3-9

Repita el ejemplo precedente para una resistencia de carga de $10\ \Omega$.

SOLUCIÓN

La Figura 3-12a representa el circuito equivalente. La resistencia total vale:

$$R_T = 0.23\ \Omega + 10\ \Omega = 10.23\ \Omega$$

La tensión total a través de R_T es:

$$V_T = 10\ \text{V} - 0.7\ \text{V} = 9.3\ \text{V}$$

Por tanto, la corriente por la carga vale:

$$I_L = \frac{9.3\ \text{V}}{10.23\ \Omega} = 0.909\ \text{A}$$

La tensión en la carga es:

$$V_L = (0.909\ \text{A})(10\ \Omega) = 9.09\ \text{V}$$

Para calcular la potencia en el diodo necesitamos saber la tensión del diodo, que se puede obtener de dos formas. Podemos restar la tensión en la carga de la tensión de la fuente:

$$V_D = 10\ \text{V} - 9.09\ \text{V} = 0.91\ \text{V}$$

o podemos usar la Ecuación (3-5):

$$V_D = 0.7\ \text{V} + (0.909\ \text{A})(0.23\ \Omega) = 0.909\ \text{V}$$

La ligera diferencia en las dos respuestas se debe al redondeo de los cálculos.

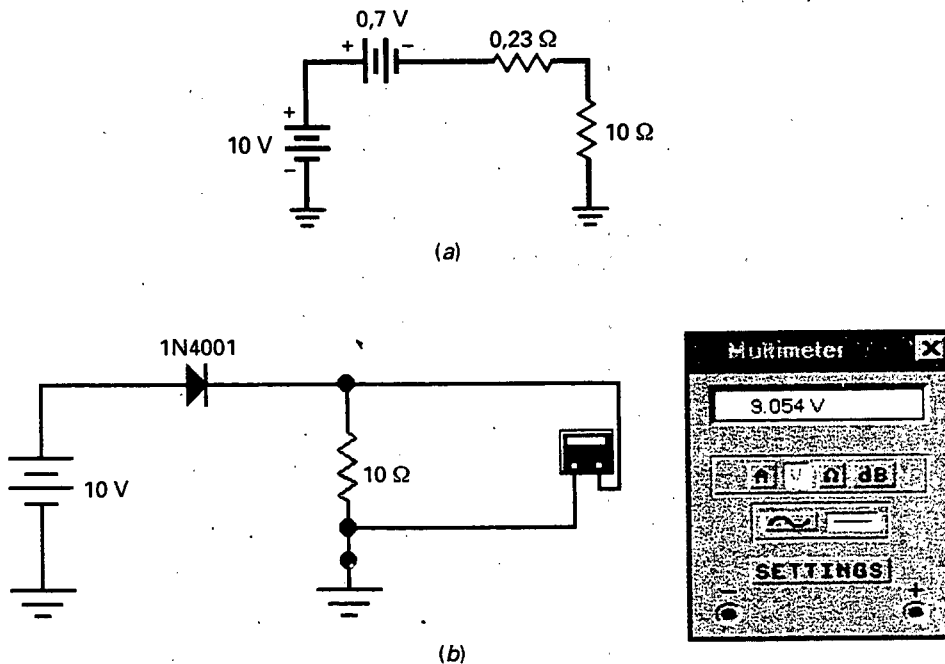


Figura 3-12

La potencia en el diodo es:

$$P_D = (0.909 \text{ V})(0.909 \text{ A}) = 0.826 \text{ W}$$

Dos aclaraciones más. Primero, el 1N4001 tiene una corriente máxima en polarización directa de 1 A y una limitación de potencia de 1 W, así que el diodo está siendo sometido a sus límites con una resistencia de 10 Ω. Segundo, la tensión en la carga calculada con la tercera aproximación es 9.09 V, que está bastante de acuerdo con la tensión en la carga de la simulación en EWB, que era 9.054 V (Fig. 3-12b).

3-5. DETECCIÓN DE AVERÍAS

El estado de un diodo se puede averiguar fácilmente con un óhmetro para un amplio rango de valores. Se mide la resistencia en continua del diodo en cualquier dirección y después se invierten los terminales, efectuándose la misma medición. La corriente con polarización directa dependerá de la escala en la que se emplee el óhmetro, lo que significa que se obtendrán distintas lecturas en rangos diferentes.

Sin embargo, lo que hay que buscar principalmente es una diferencia de resistencia inversa a directa muy alta. Para los diodos de silicio comúnmente empleados en la electrónica la razón debe ser mayor que 1.000:1. Se debe

recordar usar un fondo de escala de resistencias altas para evitar la posibilidad de dañar el diodo.

El empleo de un óhmetro para probar diodos es un ejemplo de pruebas sí/no. Realmente no importa el valor exacto de la resistencia en continua del diodo; lo único que se desea saber es si el diodo tiene una resistencia pequeña con polarización directa y grande con polarización inversa. Los siguientes ejemplos son indicativos de problemas en el diodo: resistencia extremadamente pequeña en ambas direcciones (diodo en cortocircuito); resistencia muy elevada en ambas direcciones (diodo en circuito abierto); resistencia algo baja en la dirección inversa (llamado *diodo con fugas*).

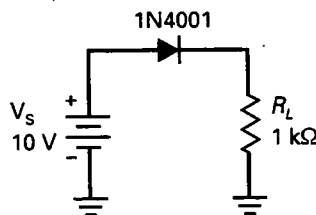


Figura 3-13. Detección de averías en un circuito.

EJEMPLO 3-10

La Figura 3-13 muestra el circuito con un diodo analizado antes. Supongamos que algo hace que el diodo se queme. ¿Qué síntomas observaríamos?

SOLUCIÓN

Cuando un diodo se quema, se convierte en un circuito abierto. En tal caso, la corriente es nula. Por tanto, si medimos la tensión en la carga, el voltímetro indicará cero.

EJEMPLO 3-11

Imaginemos que el circuito de la Figura 3-13 no funciona. Si la carga no está cortocircuitada, ¿cuál es el fallo?

SOLUCIÓN

Hay muchos fallos posibles. En primer lugar, el diodo podría estar en circuito abierto. En segundo lugar, la tensión de la fuente podría ser cero. Tercero, alguno de los conductores de conexión podría estar en circuito abierto.

¿Cómo se localiza el fallo? Medimos las tensiones para aislar el componente defectuoso. Luego desconectamos cualquier componente bajo sospecha y probamos su resistencia. Por ejemplo, primero podríamos medir la tensión en la carga y luego la tensión de la fuente. Si hay tensión en la fuente, pero no en la carga, el diodo puede estar en circuito abierto. Una prueba con el óhmetro decidirá. Si el diodo pasa la prueba del óhmetro, verifiquemos luego las conexiones, ya que no hay otra cosa que pudiese explicar la existencia de tensión en la fuente, pero no en la carga.

Si no hay tensión en la fuente, entonces la fuente de alimentación está defectuosa o bien una de las conexiones entre la fuente y el diodo está en circuito abierto. Los fallos en las fuentes de alimentación son muy comunes. A menudo, cuando el circuito electrónico no funciona, el problema se halla en la fuente de alimentación. Por esta razón, la mayoría de los que detectan averías comienzan midiendo la tensión de la fuente de alimentación.

3-6. ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

No hay nada mejor que el análisis de variables dependientes como ayuda para entender los circuitos. La idea es la que sigue. Cualquier circuito tiene variables independientes (como tensiones de alimentación y resistencia en las ramas) y variables dependientes (tensiones en las resistencias, corrientes, potencias, etc.). Cuando una variable independiente aumenta, cada una de las variables dependientes responderá, normalmente, aumentando o disminuyendo. Si entiende cómo funciona el circuito, entonces será capaz de predecir si una variable aumentará o disminuirá.

He aquí cómo funciona para un circuito como el representado en la Figura 3-14. Se aplica una tensión V_S de 10 V a un diodo en serie con una resistencia de carga R_L de 1 k Ω . En la segunda aproximación de un diodo, hay tres variables independientes para este circuito: V_S , R_L y V_K . Se incluye la tensión umbral como una variable independiente porque puede ser ligeramente diferente del valor ideal de 0,7 V. Hay cinco variables dependientes: V_L , I_L , P_D , P_L y P_T . Éstas son la tensión en la carga, la corriente por la carga, la potencia en el diodo, la potencia en la carga y la potencia total, respectivamente.

Supóngase que la tensión de la fuente V_S aumenta ligeramente, digamos un 10 por 100. ¿Cómo responderá cada una de las variables dependientes? Cada una de ellas puede aumentar (A), disminuir (D), o no mostrar cambio (N). He aquí alguno de los razonamientos que se podrían hacer al resolver este problema:

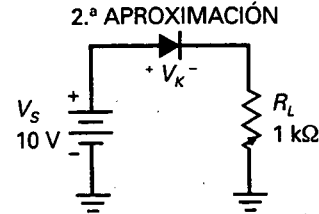


Figura 3-14. Análisis de variables dependientes de un circuito.

En la segunda aproximación, el diodo tiene una caída de tensión de 0,7 V. Si la tensión de la fuente aumenta ligeramente, la caída de tensión en el diodo sigue siendo de 0,7 V, lo que quiere decir que la tensión de la carga tiene que crecer. Un incremento en la corriente por la carga significa que las potencias en el diodo y en la carga deben aumentar. La potencia total es la suma de la potencia en el diodo y la potencia en la carga, por lo que la potencia total también lo hace.

La primera línea de la Tabla 3-1 resume el efecto de un pequeño crecimiento en la tensión de la fuente. Como se puede ver, se incrementa cada variable dependiente.

¿Qué pasaría si la resistencia de carga en la Figura 3-14 aumentase un poco? Como la tensión del diodo es constante en la segunda aproximación, la tensión de la carga no presenta ningún cambio, pero la corriente por la carga disminuirá. A su vez, esto implica una menor potencia en el diodo, menor potencia en la carga y menor potencia total. La segunda línea de la Tabla 3-1 sintetiza este caso.

Tabla 3-1. Análisis de variables dependientes

	V_L	I_L	P_D	P_L	P_T
V_S aumenta	A	A	A	A	A
R_L aumenta	N	D	D	D	D
V_K aumenta	D	D	A	D	D

Finalmente, considérese el efecto de la tensión umbral. Si ésta sufre un pequeño incremento en la Figura 3-14, las variables dependientes, excepto la potencia en el diodo, disminuyen, como se muestra en la tercera línea de la Tabla 3-1.

EJEMPLO 3-12

Veamos la Figura 3-21 (al final del capítulo). ¿Cómo emplearíamos lo visto en este apartado para hallar los cambios en las variables dependientes?

SOLUCIÓN

La idea es similar al Detector de Averías introducido en el Capítulo 1. Para evitar confusiones, siempre emplearemos un pequeño aumento en la variable independiente y hallaremos la respuesta de cada una de las variables dependientes. El primer recuadro muestra la respuesta a un pequeño incremento en la tensión de la fuente V_S . La respuesta para V_A viene dada por C3. En el recuadro grande titulado Respuestas, la C3 muestra una A, lo que significa aumento.

La forma en la que se puede practicar el análisis de variables dependientes para el circuito es la de seleccionar una variable independiente (V_S , R_1 , R_2 , R_3 o V_K). A continuación se elige cualquier variable dependiente en el cuadro (V_A , V_B , V_C , I_1 , etc.). Luego se debe averiguar si la variable dependiente aumenta, disminuye o no muestra cambio. Para comprobar su respuesta, se lee la muestra y luego la solución.

Por ejemplo, ¿cómo afecta un incremento en la tensión umbral a la corriente en R_3 ? En la Figura 3-21, un divisor fijo de tensión excita el diodo en serie con los 100 k Ω . Por tanto, un pequeño aumento en la tensión umbral hará que disminuya la tensión en los 100 k Ω . Entonces, la ley de Ohm indica que I_3 debería disminuir. Para comprobar esta respuesta, observe el cuadro titulado V_K . I_3 muestra A3. Luego A3 lleva a D, lo cual quiere decir disminución. Nuestra solución es correcta.

Una aclaración final: no use la calculadora para el análisis de variables dependientes, ya que frustra el propósito de este tipo de análisis. El análisis de variables dependientes es similar al análisis de detección de averías porque el énfasis está en la lógica en vez de en las ecuaciones. El fin del análisis de variables dependientes consiste en entrenar la mente para conocer bien el funcionamiento del circuito. Esto se logra forzando a pensar cómo interactúan las diferentes partes del circuito.

3-7. CÓMO LEER UNA HOJA DE CARACTERÍSTICAS

Buena parte de la información que el fabricante facilita en las hojas de características es oscura y de utilidad solamente para los que diseñan circuitos. Por esta razón únicamente estudiaremos aquella información de la hoja de características que describe parámetros que aparecen en este texto.

□ Tensión inversa de ruptura

Comenzaremos con la hoja de características para un 1N4001, un diodo rectificador muy popular empleado en fuentes de alimentación (es decir, los que convierten una tensión alterna en una tensión continua).

En el Apéndice hallará la hoja de características para la serie de diodos del 1N4001 al 1N4007: siete diodos que tienen las mismas características con polarización directa, pero que difieren en sus características con polarización inversa. Estamos interesados en aprender a leer la hoja de características para el diodo 1N4001 de esta familia. La primera información con el título de *Limitaciones máximas* es ésta:

	Símbolo	1N4001
Tensión inversa repetitiva de pico	V_{RRM}	50 V
Tensión inversa de pico de operación	V_{RWM}	50 V
Tensión de bloqueo en corriente continua	V_R	50 V

Estos tres símbolos especifican la ruptura en ciertas condiciones de funcionamiento. Lo único que hay que saber es que la tensión de ruptura para este diodo es de 50 V, independientemente de cómo se use. Esta ruptura se da porque en el diodo se produce la avalancha, con la que súbitamente aparece una cantidad enorme de portadores en la zona de depleción. Para un diodo rectificador como el 1N4001, la ruptura es normalmente destructiva.

Para un 1N4001, una tensión inversa de 50 V supone la destrucción del diodo, lo que debe evitar el diseñador para cualquier condición de trabajo: por este motivo se incluye un *factor de seguridad*. No existe una regla absoluta acerca del valor que debe darse al factor de seguridad, ya que éste depende de muchos elementos de diseño. Un diseño conservador emplearía un factor de 2, lo que significa que no se permite que, en ninguna circunstancia, haya una tensión inversa mayor que 25 V aplicada al 1N4001. Un diseño menos cauteloso podría permitir hasta 40 V en el 1N4001.

En otras hojas de características, la tensión inversa de ruptura puede ser designada *PIV*, *PRV* o *BV*.

□ Corriente máxima en polarización directa

Otro dato de interés es la corriente media en polarización directa, que aparece así en la hoja de características:

	Símbolo	1N4001
Corriente rectificada media en polarización directa (monofásica, carga resistiva, 60 Hz, $T_A = 75^\circ\text{C}$)	I_o	1 A

Este parámetro indica que el 1N4001 puede soportar hasta 1 A con polarización directa cuando se emplea como rectificador. En el capítulo siguiente se profundizará más acerca de la corriente rectificada media con polariza-

ción directa. Por el momento, lo único que necesita saber es que 1 A es el nivel de corriente con polarización directa para el cual el diodo se quema debido a una disipación excesiva de potencia.

De nuevo, 1 A debe ser para el diseñador una limitación máxima absoluta para el 1N4001; es decir, un nivel de corriente con polarización directa al que nunca deberá llegarse. Por ello, debe incluirse un factor de seguridad, posiblemente un factor de 2. En otras palabras, un diseño fiable debe garantizar que la corriente con polarización directa sea menor de 0,5 A en cualquier condición de funcionamiento. Los estudios de las averías de los dispositivos muestran que la vida de éstos es tanto más corta cuanto más cerca trabajen de las limitaciones máximas. Por esta razón, algunos diseñadores emplean factores de seguridad hasta de 10:1. Un diseño realmente conservador mantendría la corriente máxima con polarización directa, para un 1N4001, en 0,1 A o menos.

❑ Caída de tensión en polarización directa

En las *Características eléctricas*, en el Apéndice, el primer dato mostrado es éste:

Características y condiciones	Símbolo	Valor típico	Valor máximo
Caída de tensión máxima instantánea en polarización directa ($i_F = 1,0$, $T_j = 25\text{ °C}$)	V_F	0,93 V	1,1 V

Estas mediciones se hacen con una señal alterna y, por ello, aparece la palabra *instantánea* en la especificación. El 1N4001 típico tiene una caída de tensión en polarización directa de 0,93 V cuando la corriente es de 1 A y la temperatura de la unión es de 25 °C. Si se prueban miles de 1N4001, se hallará que pocos de ellos tienen una caída tan alta como 1,1 V cuando la corriente es de 1 A.

❑ Corriente inversa máxima

Otra información de la hoja de características que vale la pena analizar es la siguiente:

Características y condiciones	Símbolo	Valor típico	Valor máximo
Corriente inversa $T_j = 25\text{ °C}$ $T_j = 100\text{ °C}$	I_R	0,05 μA 1,0 μA	10 μA 50 μA

Ésta es la corriente con polarización inversa a la tensión continua indicada (50 V para un 1N4001). A 25 °C, el 1N4001 típico tiene una corriente

inversa de $0,05 \mu\text{A}$. Pero obsérvese cómo aumenta a $1 \mu\text{A}$ a 100°C . En el peor de los casos, la corriente inversa es de $10 \mu\text{A}$ a 25°C , y de $50 \mu\text{A}$ a 100°C . Recuérdese que esta corriente inversa incluye la corriente producida térmicamente y la corriente superficial de fugas. De estos números se puede deducir que la temperatura podría ser importante. Un diseño basado en una corriente inversa de $0,05 \mu\text{A}$ trabajará muy bien a 25°C con un 1N4001 típico, pero puede fallar en la producción en masa si el circuito tiene que funcionar en medios en los que la temperatura de la unión alcance los 100°C .

3-8. CÓMO CALCULAR LA RESISTENCIA INTERNA

Si se trata de analizar con precisión un circuito con diodos, se necesitará saber cuál es la resistencia interna del diodo. Por lo general, la resistencia interna no viene dada por separado en las hojas de características, pero éstas incluyen la información suficiente para calcularla. Ésta es la fórmula para la resistencia interna:

$$R_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \quad (3-7)$$

donde V_1 e I_1 son la tensión y la corriente en algún punto en o sobre la tensión umbral; V_2 e I_2 son la tensión y la corriente en cualquier punto más alto sobre la curva del diodo.

Por ejemplo, la hoja de características del 1N4001 (véase el Apéndice) da una tensión con polarización directa de $0,93 \text{ V}$ para una corriente de 1 A . Como se trata de un diodo de silicio, tiene una tensión umbral de aproximadamente $0,7 \text{ V}$, y una corriente cercana a cero. Por tanto, los valores que hay que emplear son $V_2 = 0,93 \text{ V}$, $I_2 = 1 \text{ A}$, $V_1 = 0,7 \text{ V}$, $I_1 = 0$. Sustituyendo estos valores en la ecuación se obtiene una resistencia interna de:

$$R_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{0,93 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ A} - 0 \text{ A}} = \frac{0,23 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 0,23 \Omega$$

Recordemos que la curva del diodo es una gráfica de la corriente en función de la tensión. La resistencia interna es igual a la inversa de la pendiente por encima de la tensión umbral. Cuanto mayor es la pendiente de la curva del diodo, menor es la resistencia. En otras palabras, cuanto más vertical es la curva después del umbral, más pequeño es el valor de la resistencia.

3-9. RESISTENCIA EN CONTINUA DE UN DIODO

Si se toma el cociente de la tensión total entre la corriente total de un diodo, se obtiene la resistencia en continua del diodo. En la zona de polarización directa, esta resistencia en continua se simboliza con R_F , y en la zona inversa, con R_R .

□ Resistencia con polarización directa

Como el diodo es una resistencia no lineal, su resistencia en continua varía según la corriente. Considérense, por ejemplo, los pares siguientes de corriente y tensión con polarización directa para un 1N914: 10 mA a 0,65 V, 30 mA a 0,75 V y 50 mA a 0,85 V. En el primer punto, la resistencia en continua es:

$$R_F = \frac{0,65 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 65 \Omega$$

En el segundo punto:

$$R_F = \frac{0,75 \text{ V}}{30 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

Y en el tercer punto:

$$R_F = \frac{0,85 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = 17 \Omega$$

Obsérvese cómo la resistencia en continua disminuye al aumentar la corriente. En cualquier caso, la resistencia con polarización directa es pequeña comparada con la resistencia en polarización inversa.

□ Resistencia con polarización inversa

Considérense ahora los dos puntos de valores de corriente y tensión en polarización inversa para el 1N914: 25 μA a 20 V; 5 μA a 75 V. En el primer punto, la resistencia en continua vale:

$$R_R = \frac{20 \text{ V}}{25 \text{ nA}} = 800 \text{ M}\Omega$$

Y en el segundo punto:

$$R_R = \frac{75 \text{ V}}{5 \mu\text{A}} = 15 \text{ M}\Omega$$

Se puede apreciar cómo la resistencia en continua disminuye al acercarnos a la tensión de ruptura (75 V).

□ Resistencia en continua frente a resistencia interna

La resistencia en continua de un diodo es diferente de la resistencia interna. La resistencia en continua de un diodo es igual a la resistencia interna *más* el efecto de la barrera de potencial. En otras palabras, la resistencia en continua de un diodo es su resistencia total, mientras que la resistencia interna es

la resistencia de sólo las zonas *p* y *n*. Por esta razón, la resistencia en continua de un diodo es siempre más grande que la resistencia interna.

3-10. RECTAS DE CARGA

Esta sección se ocupa de la *recta de carga*, una herramienta empleada para hallar el valor exacto de la corriente y la tensión del diodo. Las rectas de carga son especialmente útiles para los transistores, por lo que más adelante, en la parte relativa a éstos, se dará una explicación detallada acerca de ellas.

□ Ecuación para la recta de carga

¿Cómo se pueden hallar la corriente y la tensión exactas del diodo de la Figura 3-15a? La corriente a través de la resistencia es:

$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R_S} \quad (3-8)$$

Como los componentes están conectados en serie, la corriente es la misma a través del diodo.

□ Un ejemplo

Si la tensión de la fuente es de 2 V y la resistencia es de 100 Ω, como se muestra en la Figura 3-15b, la Ecuación (3-8) se convierte en:

$$I_D = \frac{2 - V_D}{100} \quad (3-9)$$

La Ecuación (3-9) es una relación lineal entre la corriente y la tensión. Si se traza la gráfica de esta ecuación, se obtiene una línea recta. Por ejemplo, sea V_D igual a cero. Entonces:

$$I_D = \frac{2 \text{ V} - 0 \text{ V}}{100 \Omega} = 20 \text{ mA}$$

Al dibujar este punto ($I_D = 20 \text{ mA}$, $V_D = 0$), se localiza sobre el eje vertical en la Figura 3-16. A este punto se le llama de *saturación* porque representa la corriente máxima con 2 V a través de 100 Ω.

Ahora veamos cómo obtener otro punto. Sea V_D igual a 2 V. Entonces la Ecuación (3-9) da:

$$I_D = \frac{2 \text{ V} - 2 \text{ V}}{100 \Omega} = 0$$

Cuando se halla este punto ($I_D = 0$, $V_D = 2 \text{ V}$) se obtiene el punto mostrado sobre el eje horizontal (Fig. 3-16). A este punto se le llama de *corte* porque representa la corriente mínima.

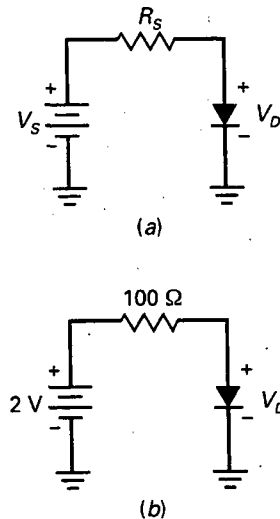


Figura 3-15. Análisis de rectas de carga.

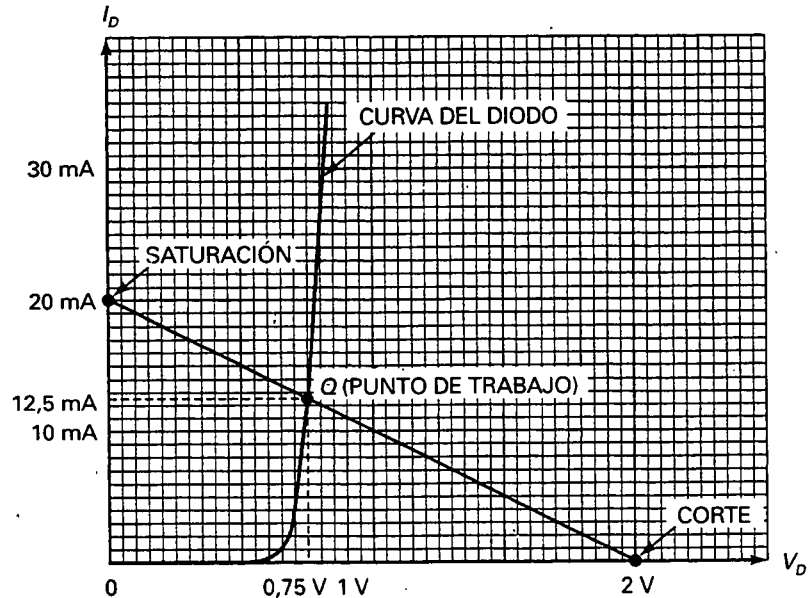


Figura 3-16. El punto Q es la intersección de la curva del diodo con la recta de carga.

Eligiendo otras tensiones se pueden calcular y trazar puntos adicionales. Como la Ecuación (3-9) es lineal, todos los puntos estarán sobre la línea recta mostrada en la Figura 3-16. La línea recta recibe el nombre de *recta de carga*.

□ El punto Q

La Figura 3-16 muestra la gráfica de una recta de carga y la curva de un diodo. El punto de intersección, conocido como punto Q , representa una solución simultánea. En otras palabras, el punto Q es el único punto en la gráfica que funciona a la vez para el diodo y para el circuito. Leyendo las coordenadas del punto Q se obtiene para el diodo una corriente aproximada de 12,5 mA y una tensión de 0,75 V.

A propósito, el punto Q no tiene ninguna relación con la figura de mérito de una bobina. En la explicación que nos ocupa, Q es una abreviación de «quiescent», que significa «en reposo». El punto Q de circuitos de semiconductores se discute en capítulos posteriores.

3-11. DIODOS DE MONTAJE SUPERFICIAL

Los diodos de montaje superficial (SM: *Surface Mounted*) se pueden encontrar en cualquier parte donde haya necesidad de una aplicación con diodos. Los diodos SM son pequeños, eficientes, y relativamente fáciles de comprobar, sacar y cambiar en una placa de circuito impreso. Aunque existen varios estilos de encapsulado para montaje en superficie, dos estilos básicos dominan la industria: SM (montaje superficial) y SOT (*Small Outline Transistor*).

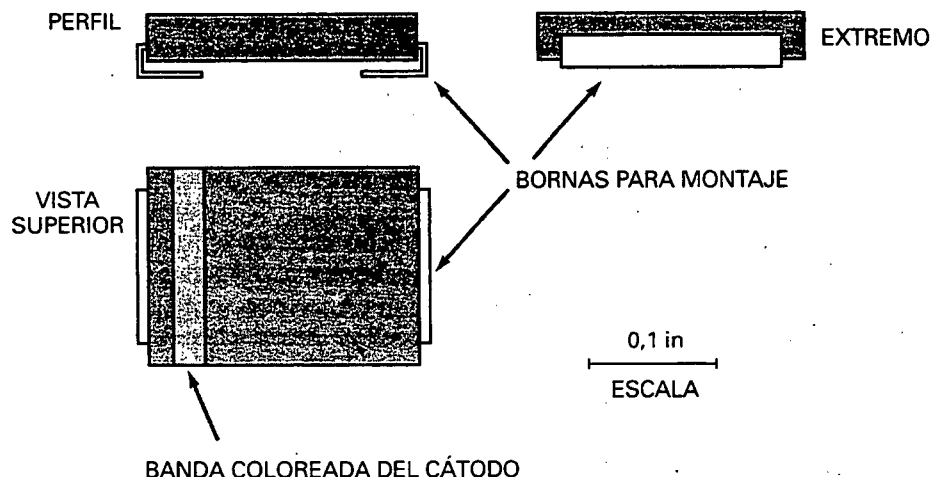


Figura 3-17. Los encapsulados SM de dos terminales usados para diodos SM.

El encapsulado SM tiene dos bornas dobladas en L y una banda coloreada en un extremo del cuerpo para indicar la borna correspondiente al cátodo. La Figura 3-17 muestra las dimensiones típicas ($1 \text{ in} = 2,54 \text{ cm}$). La longitud y el ancho del encapsulado SM se relacionan con la limitación de corriente del dispositivo. Cuanto mayor es el área de la superficie mayor es el límite de corriente. Así, un diodo SM limitado a 1 A debería tener un área de $0,434$ por $0,276 \text{ cm}$. La versión de 3 A , por otro lado, debería medir $0,624$ por $0,566 \text{ cm}$. El grosor suele ser de unos $0,247 \text{ cm}$, para todos los límites de corriente.

Incrementar el área de superficie de un diodo SM aumenta su habilidad para disipar calor. Además, el correspondiente incremento de anchura de los terminales de montaje hace lo mismo con la conductividad térmica a un sumidero virtual de calor formado por las soldaduras, masas del montaje y tarjeta del circuito en sí.

Los encapsulados SOT-23 tienen tres terminales con forma de *ala de gaviota* (Fig. 3-18). Los terminales se numeran en el sentido contrario de las agujas del reloj desde arriba, estando el pin 3 aislado en uno de los lados. Sin

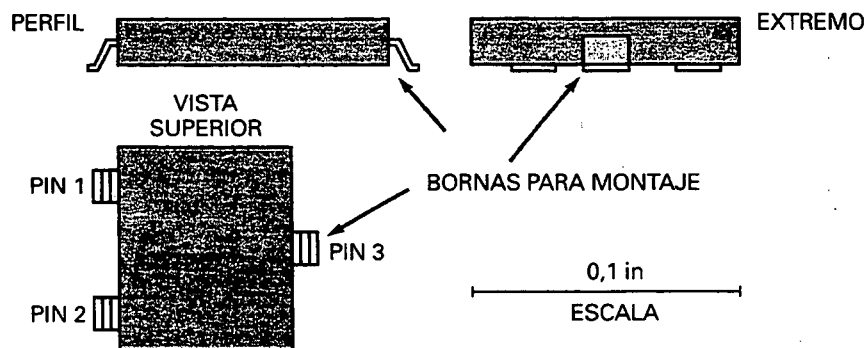


Figura 3-18. El SOT-23 es un encapsulado de transistor con tres terminales usado habitualmente para diodos SM.

embargo, no existen marcas estandarizadas para indicar cuáles son los terminales que se usan para el ánodo y el cátodo. Para determinar las conexiones internas del diodo se pueden buscar pistas impresas en el circuito, comprobar el esquema eléctrico o consultar el libro de características del fabricante. Algunos encapsulados de estilo SOT incluyen dos diodos que tienen una conexión de ánodo o cátodo común en uno de los terminales.

Los diodos encapsulados en SOT-23 son pequeños, con ninguna dimensión excediendo 0,24 cm. Su reducido tamaño hace difícil disipar grandes cantidades de calor, así que los diodos suelen estar limitados a corrientes menores que 1 A. El pequeño tamaño también hace poco práctico el etiquetado con códigos de identificación. Como ocurre con muchos de los dispositivos SM diminutos, se tiene que determinar el PIN a partir de otras pistas en la tarjeta de circuito impreso y el esquema eléctrico.

RESUMEN

Sección 3-1. Ideas básicas

Un diodo es un dispositivo no lineal. La tensión umbral es aproximadamente 0,7 V para un diodo de silicio, donde la curva directa gira hacia arriba. La resistencia interna es la resistencia óhmica de las zonas *p* y *n*. Los diodos tienen una corriente en polarización directa máxima y una limitación de potencia.

Sección 3-2. El diodo ideal

Ésta es la primera aproximación para un diodo. El circuito equivalente es un interruptor que se cierra cuando está polarizado en directa y se abre cuando lo está en inversa.

Sección 3-3. La segunda aproximación

En esta aproximación visualizamos un diodo de silicio como un interruptor en serie con una tensión umbral de 0,7 V. Si la tensión de Thevenin que ve el diodo es mayor de este valor, se cierra el interruptor.

Sección 3-4. La tercera aproximación

Rara vez la utilizamos porque, normalmente, la resistencia interna es suficientemente pequeña y se puede ignorar. En esta aproximación, visualizamos el diodo como un interruptor en serie con una tensión umbral y una resistencia interna.

Sección 3-5. Detección de averías

Cuando se sospecha que el problema está en un diodo, se emplea un óhmetro para verificar su resistencia en

cada sentido. Deberá obtenerse una resistencia pequeña en un sentido y una resistencia elevada en el sentido opuesto, al menos en una relación de 1 a 1.000. Recuerdese usar un fondo de escala de resistencias altas para evitar dañar el diodo.

Sección 3-6. Análisis de variables dependientes

En este tipo de análisis no hacen falta cálculos. Todo lo que se busca es *aumenta*, *disminuye* o *sin cambios*. Cuando se sabe de antemano cómo deberá responder una variable dependiente ante cambios de una variable independiente, será más fácil tener éxito en la búsqueda de averías, análisis y diseño.

Sección 3-7. Cómo leer una hoja de características

Las hojas de características son útiles para los diseñadores de circuitos y lo pueden ser para un reparador técnico a la hora de seleccionar el dispositivo sustituto que a veces se requiere. Las hojas de características de diferentes fabricantes contienen información similar pero se usan diferentes símbolos para indicar distintas condiciones de funcionamiento. Las hojas de características de los diodos pueden enumerar las siguientes: tensión de ruptura (V_R , V_{RRM} , V_{RWM} , PIV , PRV , BV), máxima corriente en directa ($I_{F(máx)}$, $I_{F(av)}$, I_o), caída de tensión en directa ($V_{F(máx)}$, V_F) y máxima corriente en inversa ($I_{F(máx)}$, I_{RRM}).

Sección 3-8. Cómo calcular resistencias internas

Se necesitan dos puntos en la zona directa de la tercera aproximación. Un punto puede ser 0,7 V con corrien-

te 0. El segundo proviene de la hoja de características a corrientes altas donde se especifica una tensión y una corriente.

Sección 3-9. Resistencia en continua de un diodo

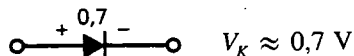
La resistencia en continua es igual a la tensión del diodo dividida por la corriente en algún punto de la curva de funcionamiento. Esta resistencia es la que medirá un óhmetro. La resistencia en continua tiene limitadas aplicaciones, aparte de comentar que es pequeña en polarización directa y grande en inversa.

Sección 3-10. Rectas de carga

La corriente y la tensión en un circuito con un diodo tendrá que satisfacer tanto la curva del diodo como la ley de Ohm para la resistencia de carga. Estos son dos requisitos diferentes que gráficamente se traducen en la intersección de la curva del diodo con la recta de carga.

DEFINICIONES

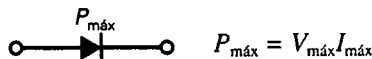
(3-1) Tensión umbral del silicio:



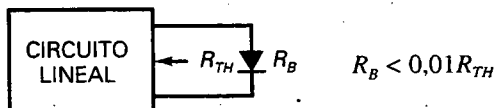
(3-2) Resistencia interna:



(3-4) Máxima disipación de potencia:

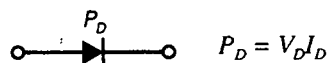


(3-6) Ignorar resistencia interna:

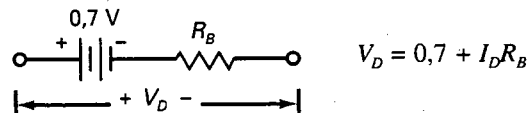


DERIVACIONES

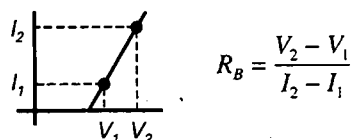
(3-3) Disipación de potencia del diodo:



(3-5) Tercera aproximación:



(3-7) Resistencia interna:



CUESTIONES

1. Cuando la representación de la corriente en función de la tensión es una línea recta, el dispositivo se conoce como
 - a) Activo
 - b) Lineal
 - c) No lineal
 - d) Pasivo
2. ¿Qué clase de dispositivo es una resistencia?
 - a) Unilateral
 - b) Lineal
 - c) No lineal
 - d) Bipolar
3. ¿Qué clase de dispositivo es un diodo?
 - a) Bilateral

- b) Lineal
 - c) No lineal
 - d) Unipolar
4. ¿Cómo está polarizado un diodo que no conduce?
 - a) Directamente
 - b) Al revés
 - c) Insuficientemente
 - d) Inversamente
 5. Cuando la corriente por el diodo es grande, la polarización es
 - a) Directa
 - b) Al revés
 - c) Escasa
 - d) Inversamente

90 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

6. La tensión umbral de un diodo es aproximadamente igual a
 - a) La tensión aplicada
 - b) La barrera de potencial
 - c) La tensión de ruptura
 - d) La tensión con polarización directa
7. La corriente inversa consiste en la corriente de portadores minoritarios y
 - a) La corriente de avalancha
 - b) La corriente con polarización directa
 - c) La corriente superficial de fugas
 - d) La corriente Zener
8. En la segunda aproximación, ¿qué tensión hay en un diodo de silicio polarizado en directo?
 - a) 0 V
 - b) 0,3 V
 - c) 0,7 V
 - d) 1 V
9. En la segunda aproximación, ¿qué corriente hay en un diodo de silicio polarizado en inversa?
 - a) 0
 - b) 1 mA
 - c) 300 mA
 - d) Ninguna de las anteriores
10. En la aproximación ideal, ¿cuál es la tensión en el diodo polarizado en directa?
 - a) 0 V
 - b) 0,7 V
 - c) Mayor que 0,7 V
 - d) 1 V
11. La resistencia interna de un 1N4001 es
 - a) 0
 - b) 0,23 Ω
 - c) 10 Ω
 - d) 1 k Ω
12. Si la resistencia interna es nula, la curva por encima de la tensión umbral es
 - a) Horizontal
 - b) Vertical
 - c) Inclínada 45°
 - d) Ninguna de las anteriores
13. El diodo ideal es generalmente adecuado para
 - a) Detección de averías
 - b) Hacer cálculos precisos
 - c) Cuando la tensión de la fuente es pequeña
 - d) Cuando la resistencia de carga es pequeña
14. La segunda aproximación funciona bien para
 - a) Detección de averías
 - b) Cuando la resistencia de carga es grande
 - c) Cuando la tensión de la fuente es grande
 - d) Todas las anteriores
15. La única ocasión en la que es necesario utilizar la tercera aproximación es cuando
 - a) La resistencia de carga es pequeña
 - b) La tensión de la fuente es muy grande
 - c) Se detectan averías
 - d) Ninguna de las anteriores

16. ¿Cuál es la corriente en el circuito de la Figura 3-19 si el diodo es ideal?
 - a) 0
 - b) 14,3 mA
 - c) 15 mA
 - d) 50 mA

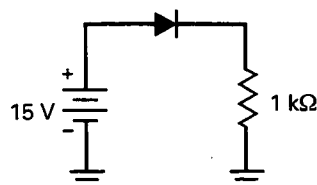


Figura 3-19

17. ¿Cuál es la corriente en el circuito de la Figura 3-19 si se emplea la segunda aproximación?
 - a) 0
 - b) 14,3 mA
 - c) 15 mA
 - d) 50 mA
18. ¿Cuál es la corriente por la resistencia de carga en la Figura 3-19 si se emplea la tercera aproximación?
 - a) 0
 - b) 14,3 mA
 - c) 15 mA
 - d) 50 mA
19. Si el diodo está abierto en la Figura 3-19, la tensión en la carga es
 - a) 0
 - b) 14,3 V
 - c) 20 V
 - d) -15 V
20. Si la resistencia de la Figura 3-19 no estuviese puesta a masa, la tensión medida entre la parte superior de la resistencia y la masa sería de
 - a) 0 V
 - b) 14,3 V
 - c) 20 V
 - d) -15 V
21. La tensión en la carga es cero en la Figura 3-19. El problema puede deberse a
 - a) Un diodo en cortocircuito
 - b) Un diodo abierto
 - c) Una resistencia de carga abierta
 - d) Demasiada tensión de la fuente de alimentación

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

Para las siguientes preguntas, siempre que sea posible dibuje circuitos, gráficas o cualquier figura que pueda ayudarle a ilustrar sus respuestas. Si usted puede combinar las respuestas y dibujos en su explicación, es más probable que haya entendido de qué está hablando. También, si está en privado, simule que está en una entrevista de trabajo y hable en alto. Esta práctica facilitará las cosas cuando la entrevista sea real.

1. ¿Ha oído usted hablar alguna vez de un diodo ideal? Si es así, dígame qué es y cuándo se puede usar.

2. Una de las aproximaciones para un diodo es la segunda aproximación. Dígame cuál es el circuito equivalente y cuándo conduce un diodo de silicio.
3. Dibuje la curva del diodo y explique sus diferentes partes.
4. Un circuito en mi banco de pruebas del laboratorio destruye un nuevo diodo cada vez que lo conecto a él. Si tuviera una hoja de características del diodo, ¿cuáles son algunas de las cantidades que necesito comprobar?
5. En términos simples describa cómo actúa un diodo cuando se polariza en directa y cuando se polariza en inversa.
6. ¿Cuál es la diferencia entre la tensión umbral típica de un diodo de germanio y uno de silicio?
7. ¿Cuál será una buena técnica para determinar la corriente a través de un diodo sin romper el circuito?
8. Si usted sospecha que hay un diodo defectuoso en una tarjeta de circuito impreso, ¿qué pasos seguiría para determinar si está realmente defectuoso?
9. Para que un diodo sea útil, ¿cuánto más grande ha de ser la resistencia inversa respecto a la directa?
10. ¿Cómo debería conectar un diodo para prevenir que una segunda batería se descargue en un vehículo de recreo y, aun así, permitir que se cargue con el alternador?
11. ¿Qué instrumentos puede usar para comprobar un diodo dentro y fuera de un circuito?
12. Describa el funcionamiento en detalle de un diodo. Incluya portadores mayoritarios y portadores minoritarios en su descripción.

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 3-1. Ideas básicas

- 3-1. Un diodo está en serie con una resistencia de $220\ \Omega$. Si la tensión en la resistencia es de 4 V , ¿cuál es la corriente por el diodo?
- 3-2. Un diodo tiene una tensión de $0,7\text{ V}$ y una corriente de 50 mA . ¿Cuál es la potencia en el diodo?
- 3-3. Dos diodos están conectados en serie. El primer diodo tiene una tensión de $0,75\text{ V}$ y el segundo tiene una tensión de $0,8\text{ V}$. Si la corriente en el primer diodo es de 500 mA , ¿cuál es la corriente en el segundo diodo?

Sección 3-2. El diodo ideal

- 3-4. Calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia del diodo y la potencia total para el circuito de la Figura 3-20a.
- 3-5. Si el valor de la resistencia se duplica en la Figura 3-20a, ¿cuál será la corriente por la carga?

- 3-6. Calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia del diodo y la potencia total para el circuito de la Figura 3-20b.
- 3-7. Si en la Figura 3-20b se duplica el valor de la resistencia, ¿cuál será la corriente por la carga?
- 3-8. Si la polaridad del diodo se invierte en la Figura 3-20b, ¿cuál será la corriente por el diodo? ¿Y la tensión en el diodo?

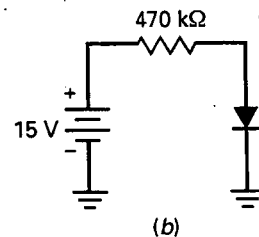
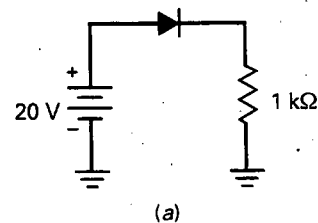


Figura 3-20

Sección 3-3. La segunda aproximación

- 3-9. Para la Figura 3-20a, calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia en el diodo y la potencia total.
- 3-10. Si el valor de la resistencia se duplica en la Figura 3-20a, ¿cuál será el valor de la corriente por la carga?
- 3-11. Para el circuito de la Figura 3-20b, calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia en el diodo y la potencia total.
- 3-12. Si en la Figura 3-20b el valor de la resistencia se duplica, ¿cuál será la corriente por la carga?
- 3-13. Si la polaridad del diodo se invierte en la Figura 3-20b, ¿cuál será la corriente en el diodo? ¿Y la tensión del diodo?

Sección 3-4. La tercera aproximación

- 3-14. Para el circuito de la Figura 3-20a, calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia en el diodo y la potencia total ($R_b = 0,23\ \Omega$).
- 3-15. Si en la Figura 3-20a el valor de la resistencia se duplica, ¿cuál será el valor de la corriente por la carga? ($R_b = 0,23\ \Omega$).

92 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

- 3-16. Para la Figura 3-20b, calcule la corriente, la tensión y la potencia en la carga, así como la potencia en el diodo y la potencia total ($R_B = 0,23 \Omega$).
- 3-17. ¿Cuál será el valor de la corriente por la carga, si en la Figura 3-20b el valor de la resistencia se duplica? ($R_B = 0,23 \Omega$).
- 3-18. Si en la Figura 3-20b se invierte la polaridad del diodo, ¿cuál será el valor de la corriente por el diodo? ¿Y la tensión del diodo?

Sección 3-5. Detección de averías

- 3-19. Suponga que la tensión en el diodo de la Figura 3-21a es de 5 V. ¿Está el diodo abierto o en cortocircuito?

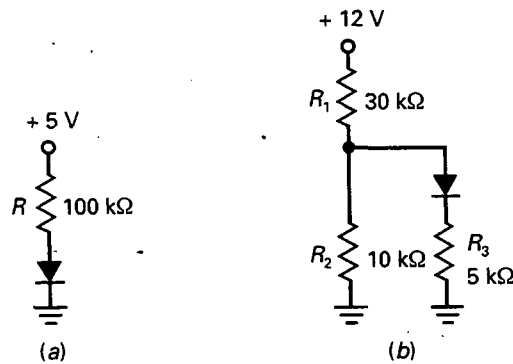


Figura 3-21

- 3-20. Por alguna razón, R se pone en cortocircuito en la Figura 3-21a. ¿Cuál será la tensión del diodo? ¿Qué pasará con el diodo?
- 3-21. Se mide 0 V en el diodo de la Figura 3-21a. A continuación se comprueba la tensión de la fuente y lee +5 V con respecto a masa. ¿Cuál es la avería en el circuito?
- 3-22. En la Figura 3-21b se mide un potencial de +3 V en la unión de R_1 y R_2 . (Recuerde que los potenciales se miden siempre con respecto a tierra.) A continuación mide 0 V en la unión del diodo y la resistencia de 5 kΩ. Mencione algunos fallos posibles.
- 3-23. Se mide 0 V en la unión de R_1 y R_2 de la Figura 3-21b. ¿Cuáles son algunas de las cosas que podrían estar fallando en este circuito?

Sección 3-7. Cómo leer una hoja de características

- 3-24. ¿Qué diodo elegiría en la serie 1N4001 si tuviese que soportar una tensión inversa de pico repetitiva de 700 V?

- 3-25. La hoja de características muestra una banda en un extremo del diodo. ¿Cómo se llama esta banda? La flecha del diodo del símbolo eléctrico, ¿apunta hacia esta banda o se aleja de ella?
- 3-26. El agua en ebullición tiene una temperatura de 100 °C. Si un 1N4001 se cae en un recipiente con agua hirviendo, ¿se destruirá o no? Justifique su respuesta.

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 3-27. A continuación se ofrece una lista con algunos diodos y sus especificaciones para las peores condiciones:

Diodo	I_F	I_R
1N914	10 mA a 1 V	25 nA a 20 V
1N4001	1 A a 1,1 V	10 μA a 50 V
1N1185	10 A a 0,95 V	4,6 mA a 100 V

Calcule la resistencia con polarización directa e inversa para cada uno de estos diodos.

- 3-28. En la Figura 3-21a, ¿qué valor debe tener R_B para que la corriente por el diodo sea aproximadamente de 10 mA?
- 3-29. ¿Cuál debe ser el valor de R_2 en la Figura 3-21b para que la corriente por el diodo sea de 0,25 mA?
- 3-30. Un diodo de silicio tiene una corriente con polarización directa de 50 mA a 1 V. Aplique la tercera aproximación para calcular la resistencia interna.
- 3-31. Dado un diodo de silicio con una corriente inversa de 5 μA a 25 °C y 100 μA a 100 °C, calcule la corriente superficial de fugas.
- 3-32. En la Figura 3-21b, la alimentación se desconecta y el extremo superior de R_1 se pone a masa. A continuación se emplea un óhmetro para leer las resistencias con polarización directa e inversa del diodo. Las dos lecturas resultan ser idénticas. ¿Cuál es la lectura del óhmetro?
- 3-33. Algunos sistemas, como las alarmas antirrobo y los ordenadores, emplean una reserva de baterías para el caso de que la fuente de alimentación principal fallase. Describa cómo funciona el circuito de la Figura 3-22.

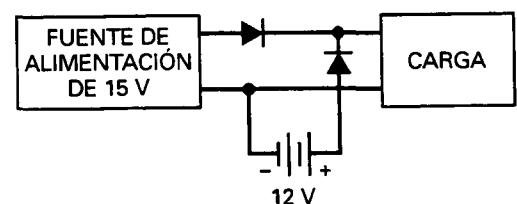


Figura 3-22

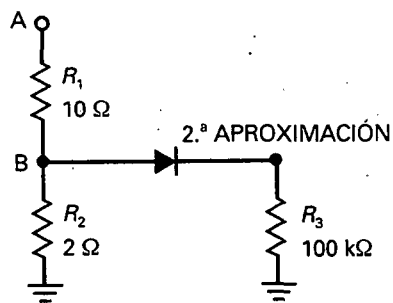
ANÁLISIS DE VARIABLES DEPENDIENTES

Emplee la Figura 3-23 para los problemas restantes. Suponga aumentos aproximados del 10 por 100 en cada variable independiente y use la segunda aproximación para un diodo.

- 3-34. Trate de predecir la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado V_S . Compruebe sus contestaciones. Luego, conteste la pregunta siguiente tan directa y sencillamente como le sea posible: ¿qué efecto tiene un aumento de la tensión de la fuente sobre las variables dependientes del circuito?
- 3-35. Deduzca la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_1 . Veri-

fique sus contestaciones. Luego, en una o dos frases, resuma sus conclusiones.

- 3-36. Dé la solución a cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_2 . Verifique sus contestaciones. Enumere las variables dependientes que disminuyen y explique por qué disminuyen, empleando la ley de Ohm o ideas básicas similares.
- 3-37. Señale la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado R_3 . Enumere las variables dependientes que no cambian y explique por qué no cambian.
- 3-38. Obtenga la respuesta de cada una de las variables dependientes del cuadro titulado V_K . Enumere las variables dependientes que disminuyen y explique por qué disminuyen.



	1	2	3	4	5	6
A	A	A	D	D	A	D
B	A	D	A	A	N	D
C	D	N	A	D	N	N
D	D	A	N	A	D	A
E	A	A	N	D	D	A
F	N	N	D	A	N	A

RESPUESTAS

V_S	R_1	R_2	R_3	V_K
$V_A: C3$	$V_A: C2$	$V_A: C6$	$V_A: F1$	$V_A: E3$
$V_B: A5$	$V_B: B6$	$V_B: A1$	$V_B: B5$	$V_B: F1$
$V_C: E6$	$V_C: F3$	$V_C: D6$	$V_C: F2$	$V_C: C4$
$I_1: B1$	$I_1: A3$	$I_1: B2$	$I_1: B1$	$I_1: D3$
$I_2: E2$	$I_2: C1$	$I_2: C4$	$I_2: F5$	$I_2: F5$
$I_3: D4$	$I_3: A6$	$I_3: F4$	$I_3: E4$	$I_3: A3$
$P_1: A2$	$P_1: E5$	$P_1: D5$	$P_1: C2$	$P_1: C2$
$P_2: B4$	$P_2: D1$	$P_2: B3$	$P_2: F1$	$P_2: E3$
$P_3: F6$	$P_3: A4$	$P_3: E1$	$P_3: D5$	$P_3: A4$

Figura 3-23. Análisis de variables dependientes.

4

Circuitos con diodos

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Dibujar el esquema de un circuito rectificador de media onda y explicar su funcionamiento.
- Comprender el papel del transformador de entrada en las fuentes de alimentación.
- Trazar el esquema de un circuito rectificador de onda completa y comentar su funcionamiento.
- Dibujar el esquema de un puente rectificador y explicar su funcionamiento.
- Encontrar las tres principales características de un diodo rectificador en una hoja de características de un catálogo.
- Explicar cómo funciona un recortador y dibujar formas de onda.
- Exponer el funcionamiento de un cambiador de nivel de continua y trazar sus formas de onda.
- Describir el modo en el que operan los multiplicadores de tensión.
- Comprender el funcionamiento y la necesidad del condensador de entrada como filtro dentro de la fuente de corriente.

VOCABULARIO

- | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------------------|
| • cambiador de nivel de continua | • detector de pico | • polarización |
| • circuito integrado | • filtro | • recortador |
| • circuito integrado de regulación de tensión | • filtro con condensador a la entrada | • rectificador |
| • condensador polarizado | • filtro de choque | • resistencia inicial |
| • corriente inicial | • filtro pasivo | • rizado |
| • corriente por la carga unidireccional | • forma de onda | • señal de media onda |
| | • fuente de alimentación | • tensión inversa de pico |
| | • multiplicador de tensión | • valor de continua de la señal |

La mayoría de los dispositivos electrónicos, televisores, equipo estéreo y ordenadores necesitan una tensión continua para funcionar correctamente. Como las líneas de tensión son alternas, la primera cosa que necesitamos hacer es convertir la tensión de línea alterna en tensión continua. La parte del dispositivo electrónico que produce esta tensión continua se llama fuente de potencia. Dentro de las fuentes de potencia hay circuitos que permiten que la corriente fluya sólo en una dirección. Estos circuitos se llaman rectificadores. Este capítulo explica los circuitos rectificadores, filtros, recortadores, cambiadores de nivel de continua y multiplicadores de tensión.

4-1. RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA

La Figura 4-1a muestra un circuito rectificador de media onda. La fuente de corriente alterna produce una tensión sinusoidal. Suponiendo un diodo ideal, la mitad positiva del ciclo de la tensión de fuente polarizará el diodo en

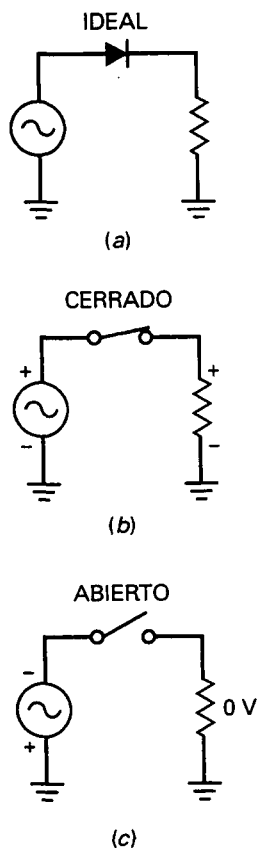


Figura 4-1. a) Rectificador ideal de media onda; b) en la mitad positiva del ciclo; c) en la mitad negativa del ciclo.

directa. Como el interruptor está cerrado, como se muestra en la Figura 4-1b, la mitad positiva del ciclo de la tensión de fuente aparecerá a través de la resistencia de carga. En la mitad negativa del ciclo, el diodo está polarizado en inversa. En este caso el diodo ideal aparecerá como un interruptor abierto y no hay tensión a través de la resistencia de carga (Fig. 4-1c).

Formas de onda ideales

La Figura 4-2a muestra una representación gráfica de la forma de onda de la tensión de entrada. Es una onda sinusoidal con un valor instantáneo v_{in} y un valor de pico de $V_{p(in)}$. Una sinusoide pura como ésta tiene un valor medio de cero en un ciclo porque cada tensión instantánea tiene una tensión igual y opuesta medio ciclo después. Si se mide esta tensión con un voltímetro de continua, se leerá 0 porque un voltímetro de continua indica el valor medio.

En el rectificador de media onda de la Figura 4-2b, el diodo está conduciendo durante las mitades positivas de los ciclos pero no está conduciendo durante las mitades negativas. A causa de esto, el circuito recorta las mitades negativas de los ciclos, como se muestra en la Figura 4-2c. Denominamos a una forma de onda como ésta una *señal de media onda*. Esta tensión de media onda produce una *corriente por la carga unidireccional*. Esto significa que sólo circula en una dirección.

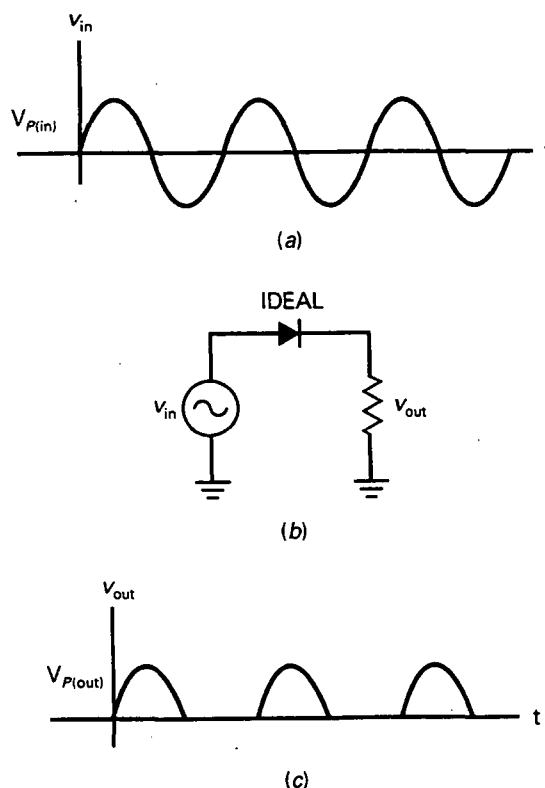


Figura 4-2. a) Entrada a un rectificador de media onda; b) circuito; c) salida de un rectificador de media onda.

Una señal de media onda como la de la Figura 4-2c es una tensión continua pulsante que se incrementa a un máximo, decrece a cero, y después permanece en 0 durante la mitad negativa del ciclo.

Éste no es el tipo de tensión continua que necesitamos para los equipos electrónicos. Lo que necesitamos es una tensión constante, la misma que se obtiene de una batería. Para obtener este tipo de tensión, necesitamos filtrar la señal de media onda (se expone más tarde en este capítulo).

Cuando se detectan averías, se puede usar el diodo ideal para analizar el rectificador de media onda. Es útil recordar que la tensión de salida de pico es igual a la tensión de entrada de pico:

$$\text{Media onda ideal: } V_{p(out)} = V_{p(in)} \quad (4-1)$$

□ Valor de continua de la señal de media onda

El valor de continua de una señal es el mismo que el valor medio. Si usted mide una señal con un voltímetro de continua, la lectura será igual al valor medio.

En cursos básicos se deriva el valor de continua de una señal de media onda. La fórmula es:

$$\text{Media onda: } V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} \quad (4-2)$$

La prueba de esta derivación requiere algunos cálculos porque hay que deducir el valor medio sobre un ciclo.

Como $1/\pi \approx 0,318$, se puede ver la Ecuación (4-2) escrita de la siguiente forma:

$$V_{dc} \approx 0,318V_p$$

Cuando la ecuación se escribe de esta manera, es posible que el valor de continua o medio sea igual a 31,8 por 100 del valor de pico. Por ejemplo, si la tensión de pico de la señal de media onda es 100 V, la tensión continua o media vale 31,8 V.

□ Frecuencia de salida

La frecuencia de salida es la misma que la frecuencia de entrada. Esto tiene sentido cuando se compara la Figura 4-2c con la Figura 4-2a. Cada ciclo de la tensión de entrada produce un ciclo de la tensión de salida. Por tanto, podemos escribir:

$$\text{Media onda: } f_{out} = f_{in} \quad (4-3)$$

Se empleará esta derivación más tarde con los filtros.

□ Segunda aproximación

No obtenemos una tensión de media onda perfecta a través de la resistencia de carga. A causa de la barrera de potencial, el diodo no se activa hasta que la tensión de la fuente alterna alcanza aproximadamente 0,7 V. Cuando la tensión de pico de la fuente es mucho mayor que 0,7 V, la tensión en la carga recordará a una señal de media onda. Por ejemplo, si la tensión de pico de fuente es 100 V, la tensión en la carga será muy cercana a una tensión de media onda. Si la tensión de pico de la fuente es sólo 5 V, la tensión en la carga tendrá un pico de sólo 4,3 V. Cuando necesitamos obtener una mejor respuesta, se puede usar esta derivación:

$$2.^{\text{a}} \text{ media onda: } V_{p(\text{out})} = V_{p(\text{in})} - 0,7 \text{ V} \quad (4-4)$$

□ Aproximaciones superiores

La mayoría de los diseñadores se aseguran de que la resistencia interna sea mucho menor que la resistencia de Thevenin que ve el diodo. A causa de esto podemos ignorar la resistencia interna en la mayoría de los casos. Si se necesita tener mayor precisión que la que puede obtener con la segunda aproximación, se debería usar un ordenador y un simulador de circuitos como *Electronics Workbench* (EWB).

EJEMPLO 4-1

La Figura 4-3 muestra un rectificador de media onda que usted puede construir en el laboratorio o en un ordenador con EWB. Se pone un osciloscopio sobre 1 k Ω . Esto nos mostrará la tensión en la carga de media onda. También se pone un polímetro al través de 1 k Ω para leer la tensión en la carga en continua. Calcule los valores teóricos de la tensión de pico en la carga y la tensión continua en la carga. Después, compare estos valores con las lecturas del osciloscopio y polímetro.

SOLUCIÓN

En la Figura 4-3 aparece una fuente alterna de 10 V y 60 Hz.

Las representaciones normalmente muestran las fuentes de tensión alternas, valores eficaces o rms. Recordemos que el valor eficaz es el valor de una tensión continua que produce el mismo efecto calorífico que una tensión alterna.

Cómo la tensión de la fuente es 10 V rms, lo primero que hay que hacer es calcular el valor de pico de la fuente alterna. Usted sabe por cursos anteriores que el valor rms de un seno es igual a:

$$V_{\text{rms}} = 0,707 V_p$$

Por tanto, la tensión de pico de la fuente en la Figura 4-3 es:

$$V_p = \frac{V_{\text{rms}}}{0,707} = \frac{10 \text{ V}}{0,707} = 14,1 \text{ V}$$

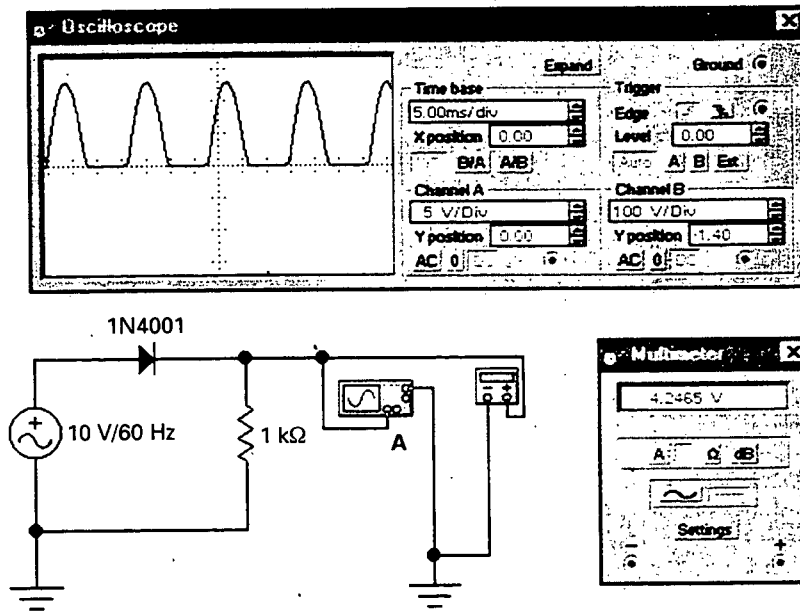


Figura 4-3. Ejemplo de laboratorio de rectificador de media onda.

Con un diodo ideal, la tensión de pico en la carga es:

$$V_{p(out)} = V_{p(in)} = 14,1 \text{ V}$$

La tensión en la carga en continua es:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} = \frac{14,1 \text{ V}}{\pi} = 4,49 \text{ V}$$

Con la segunda aproximación, obtenemos una tensión de pico en la carga de:

$$V_{p(out)} = V_{p(in)} - 0,7 \text{ V} = 14,1 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 13,4 \text{ V}$$

Y la tensión continua en la carga de:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} = \frac{13,4 \text{ V}}{\pi} = 4,27 \text{ V}$$

La Figura 4-3 muestra los valores que un osciloscopio y un polímetro leerán. El canal A del osciloscopio se coloca a cinco voltios por cada división (5 V/Div.). La señal de media onda tiene un valor de pico entre 13 y 14 voltios, lo cual está de acuerdo con el resultado de nuestra segunda aproximación. El polímetro también da un resultado de acuerdo con los valores teóricos, porque lee aproximadamente 4,25 V.

4-2. EL TRANSFORMADOR

En Estados Unidos, las compañías eléctricas proporcionan una tensión de red nominal de 120 V rms a una frecuencia de 60 Hz (en Europa, la tensión nominal es de 220 V a 50 Hz). La tensión real de un enchufe eléctrico fluctúa entre los 105 y los 125 V rms, dependiendo de la hora, la localidad y de otros factores. La tensión de la red es demasiado elevada para la mayor parte de los dispositivos empleados en circuitos electrónicos. Por esta causa, generalmente se emplea un transformador en casi todos los equipos electrónicos. El transformador reduce la tensión a niveles inferiores, más adecuados para su uso en diodos y transistores y otros dispositivos semiconductores.

□ Idea básica

En cursos anteriores se estudian los transformadores en detalle. Todo lo que necesitamos en este capítulo es un breve repaso. En la Figura 4-4 se ve un ejemplo de un transformador. Aquí se ve una línea de tensión aplicada al arrollamiento primario de un transformador. Normalmente el enchufe tiene una tercera conexión para poner a tierra el equipo. A causa de la relación de espiras N_1/N_2 , la tensión del secundario se ve reducida cuando N_1 es mayor que N_2 .

□ Puntos indicadores de fase

Recuerde el significado de los puntos indicadores de fase que se ponen en los extremos superiores de los arrollamientos. Los extremos con puntos tienen la misma fase instantánea. En otras palabras, cuando un semiciclo positivo aparece a través del primario, un semiciclo positivo aparece a través del secundario. Si el secundario estuviera en el extremo de tierra, la tensión de el secundario tendría 180° de desfase con respecto a la tensión del primario.

En el semiciclo positivo de la tensión del primario, el arrollamiento secundario tiene una onda de medio seno positivo a través de él y el diodo está polarizado en directa. En el semiciclo negativo de la tensión del primario, el arrollamiento secundario tiene un semiciclo negativo y el diodo está polarizado en inversa. Suponiendo un diodo ideal, obtendremos una tensión en la carga de media onda.

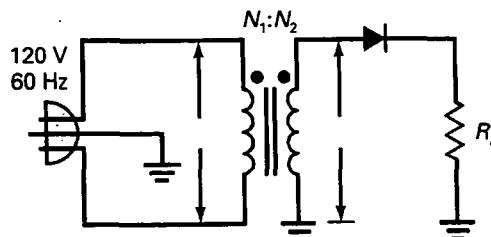


Figura 4-4. Rectificador de media onda con transformador.

Relación de espiras

Recuerde de cursos anteriores la siguiente derivación:

$$V_2 = \frac{V_1}{N_1/N_2} \quad (4-5)$$

Esto dice que la tensión en el secundario es igual a la tensión del primario dividida por la relación de espiras. Algunas veces verá esta forma equivalente:

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

lo que indica que la tensión en el secundario es igual a la inversa de la relación de espiras multiplicado por la tensión en el primario.

Se puede usar cualquiera de las dos fórmulas para rms, valores de pico y tensiones instantáneas. La mayoría del tiempo, usaremos la Ecuación (4-5) con valores rms porque las fuentes de tensión alternas se especifican casi siempre como valores rms.

Los términos elevar y reducir también se encuentran cuando se trata con transformadores. Estos términos siempre relacionan la tensión del secundario con la tensión del primario. Esto significa que un transformador elevador producirá una tensión en el secundario que es mayor que en el primario, y un transformador reductor producirá una tensión en el secundario que es más pequeña que en el primario.

EJEMPLO 4-2

¿Cuáles son la tensión de pico en la carga y la tensión continua en la carga en la Figura 4-5?

SOLUCIÓN

El transformador tiene una relación de espiras de 5:1. Esto significa que la tensión rms del secundario es un quinto de la tensión en el primario:

$$V_2 = \frac{120 \text{ V}}{5} = 24 \text{ V}$$

Y la tensión de pico en el secundario es:

$$V_p = \frac{24 \text{ V}}{0.707} = 34 \text{ V}$$

Con un diodo ideal, la tensión de pico en la carga es:

$$V_{p(out)} = 34 \text{ V}$$

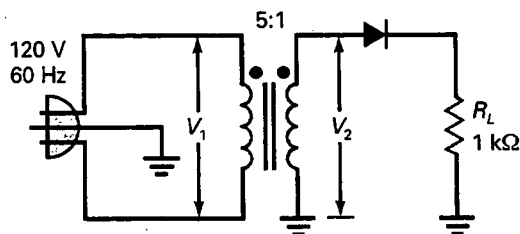


Figura 4-5

La tensión continua en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} = \frac{34 \text{ V}}{\pi} = 10,8 \text{ V}$$

Con la segunda aproximación, la tensión de pico en la carga es:

$$V_{p(out)} = 34 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 33,3 \text{ V}$$

Y la tensión continua en la carga es:

$$V_{dc} = \frac{V_p}{\pi} = \frac{33,3 \text{ V}}{\pi} = 10,6 \text{ V}$$

4-3. EL RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

La Figura 4-6a muestra un rectificador de onda completa. Aprecie la conexión intermedia llevada a masa en el arrollamiento secundario. Debido a esta conexión central el circuito es equivalente a dos rectificadores de media onda. Cada uno de estos rectificadores tiene una tensión de entrada igual a la mitad de la tensión del secundario. D_1 conduce durante el semiciclo positivo y D_2 conduce durante el semiciclo negativo. Como resultado la corriente por la carga rectificada circula durante ambos semiciclos. El rectificador de onda completa actúa como dos rectificadores de media onda superpuestos.

En la Figura 4-6b se representa el circuito equivalente para el semiciclo positivo. Como se puede comprobar, D_1 está polarizado en directa. Esto produce una tensión positiva en la carga como se indica por la polaridad más-menos en la resistencia de carga. La Figura 4-6c muestra el circuito equivalente para el semiciclo negativo. Esta vez D_2 está polarizado en directa. Como se puede comprobar, esto también produce una tensión en la carga positiva.

Durante ambos semiciclos, la tensión en la carga tiene la misma polaridad y la corriente por la carga circula en la misma dirección. El circuito se denomina un **rectificador de onda completa** porque *ha cambiado la tensión alterna de entrada a una tensión de salida pulsante continua*, mostrada en la Figura 4-6d. Esta forma de onda tiene algunas propiedades interesantes que exponemos ahora.

□ Valor de continua o valor medio

La señal de onda completa tiene el doble de ciclos positivos que la señal de media onda, el valor de continua o valor medio es el doble, dado por:

$$\text{Onda completa: } V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi} \quad (4-6)$$

Como $2/\pi = 0,636$, se puede ver la Ecuación (4-6) escrita como:

$$V_{dc} \approx 0,636V_p$$

De esta forma, usted puede ver que el valor de continua o valor medio es igual al 63,6 por 100 del valor de pico. Por ejemplo, si la tensión de pico de la señal de onda completa es 100 V, el valor de continua o valor medio es 63,6 V.

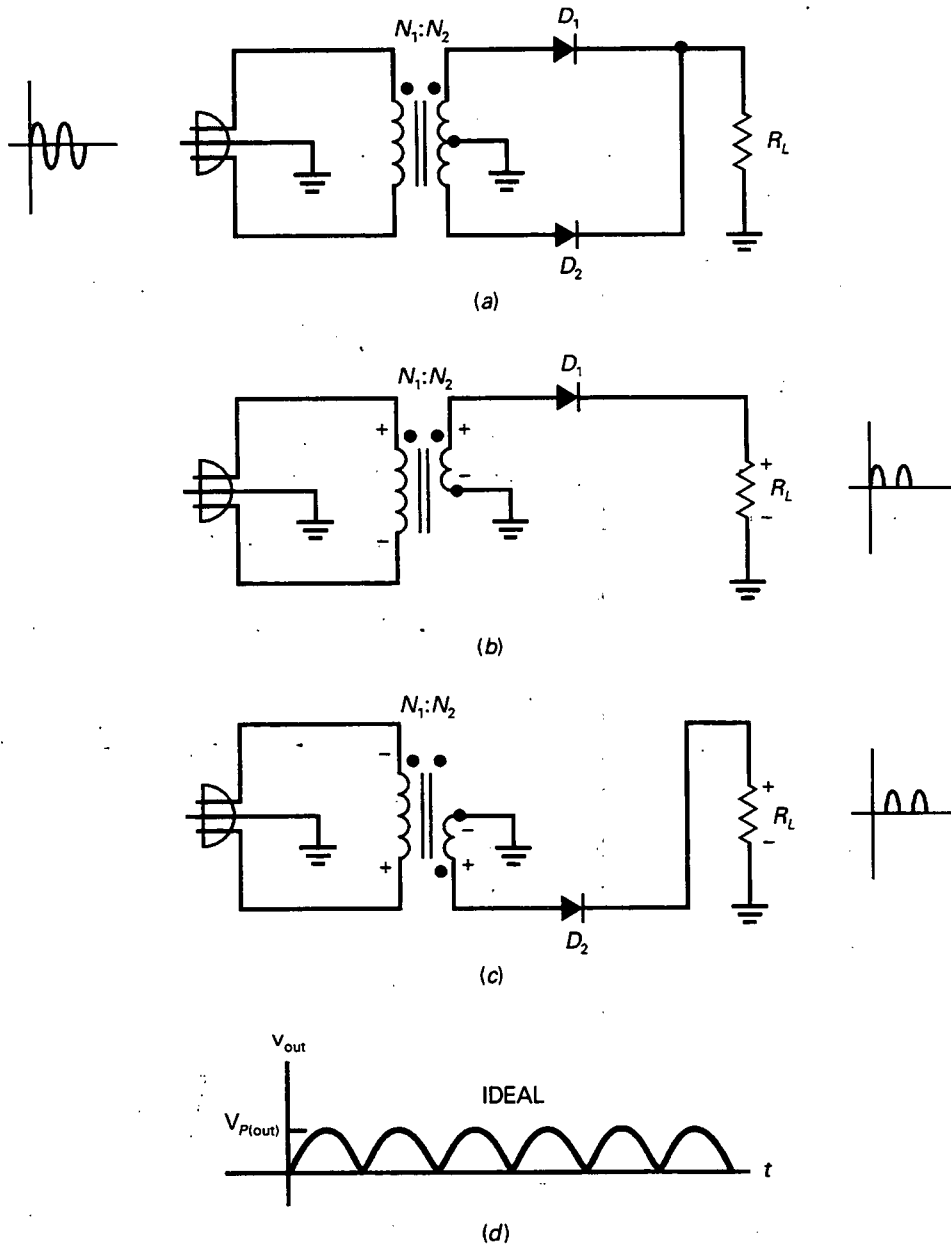


Figura 4-6. a) Rectificador de onda completa; b) circuito equivalente para el semiciclo positivo; c) circuito equivalente para el semiciclo negativo; d) salida de onda completa.

□ Frecuencia de salida

Con un rectificador de media onda la frecuencia de salida es igual a la de entrada. Pero con un rectificador de onda completa algo inusual le sucede a

la frecuencia de salida. La tensión de una línea de alterna tiene una frecuencia de 60 Hz*. Por tanto, el período en la entrada es igual a:

$$T_{in} = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16,7 \text{ ms}$$

A causa de la rectificación de onda completa, el período de la señal de onda completa es la mitad que el período de entrada:

$$T_{out} = 0,5(16,7 \text{ ms}) = 8,33 \text{ ms}$$

(Si existe alguna duda, compare la Figura 4-6d con la Figura 4-6c). Cuando calculamos la frecuencia de salida obtenemos:

$$f_{out} = \frac{1}{T_{out}} = \frac{1}{8,33 \text{ ms}} = 120 \text{ Hz}$$

La frecuencia de la señal de onda completa es el doble de la frecuencia de entrada. Esto tiene sentido. Una salida de onda completa tiene el doble de ciclos que una entrada sinusoidal. El rectificador de onda completa invierte cada semiciclo negativo, así que se obtienen el doble de semiciclos positivos. El efecto es duplicar la frecuencia. Como una derivación:

$$\text{Onda completa: } f_{out} = 2f_{in} \quad (4-7)$$

❑ Segunda aproximación

Como el rectificador de onda completa actúa como dos rectificadores de media onda superpuestos, podemos usar la segunda aproximación dada anteriormente. La idea consiste en restar 0,7 V de la tensión de salida de pico ideal. El siguiente ejemplo ilustrará la idea.

EJEMPLO 4-3

La Figura 4-7 muestra un rectificador de onda completa que usted puede construir en un laboratorio o en un ordenador con EWB. El canal A del osciloscopio muestra la tensión del primario (onda sinusoidal), y el canal B muestra la tensión de la carga (señal de onda completa). Calcule la tensión de pico en la entrada y en la salida. Después compare los valores teóricos con los valores medidos.

* N. del T.: Datos numéricos correspondientes a EE.UU. En Europa son ligeramente distintos debido a que la tensión alterna tiene una frecuencia de 50 Hz. En este libro, por coherencia, casi siempre se utilizarán los datos correspondientes a la red eléctrica de 60 Hz y 120 V rms de los EE.UU.

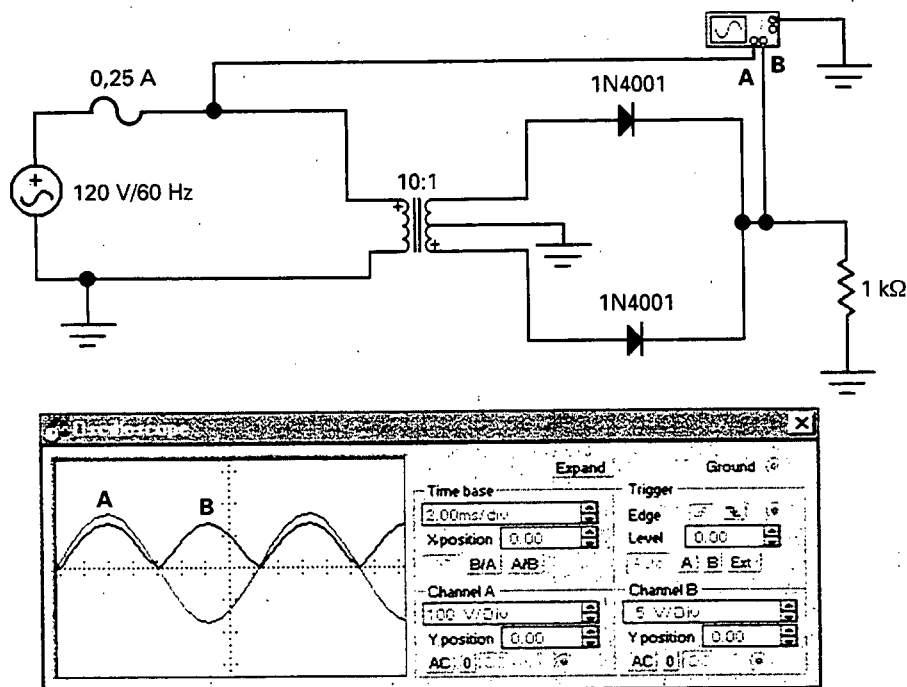


Figura 4-7. Ejemplo de laboratorio de un rectificador de onda completa.

SOLUCIÓN

La tensión de pico en el primario es:

$$V_{p(1)} = \frac{V_{rms}}{0.707} = \frac{120 \text{ V}}{0.707} = 170 \text{ V}$$

A causa del transformador reductor de relación 10 : 1, la tensión de pico en el secundario es:

$$V_{p(2)} = \frac{V_{p(1)}}{N_1/N_2} = \frac{170 \text{ V}}{10} = 17 \text{ V}$$

El rectificador de onda completa actúa como dos rectificadores de media onda superpuestos. A causa de la conexión central, la tensión de entrada en cada rectificador de media onda es solo la mitad de la tensión del secundario:

$$V_{p(in)} = 0.5(17 \text{ V}) = 8.5 \text{ V}$$

Idealmente la tensión en la salida es:

$$V_{p(out)} = 8.5 \text{ V}$$

Usando la segunda aproximación:

$$V_{p(out)} = 8,5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 7,8 \text{ V}$$

Ahora, comparemos los valores teóricos con los valores medidos. La sensibilidad del canal A es 100 V/Div. Como la entrada sinusoidal ocupa aproximadamente 1,7 divisiones, su valor de pico es aproximadamente 170 V. El canal B tiene una sensibilidad de 5 V/Div. Como la salida de onda completa ocupa aproximadamente 1,4 Div, su valor de pico es aproximadamente de 7 V. Ambas lecturas de entrada y salida concuerdan razonablemente con los valores teóricos.

Una vez más nótese que la segunda aproximación mejora la respuesta sólo ligeramente. Si estuviera detectando averías, la mejora no sería de mucho valor. Si algo fue mal con el circuito, lo más probable es que la salida de onda completa difiera drásticamente del valor ideal de 8,5 V.

EJEMPLO 4-4

Si uno de los diodos en la Figura 4-7 estuviera abierto, ¿qué sucedería con las diferentes tensiones?

SOLUCIÓN

Si uno de los diodos estuviera abierto, el circuito se convierte en un rectificador de media onda. En este caso la mitad de la tensión en el secundario es todavía 8,5 V, pero la tensión en la carga será una señal de media onda en vez de una señal de onda completa. Esta tensión de media onda todavía tendrá un pico de 8,5 V (idealmente) o 7,8 V (segunda aproximación).

4-4. EL PUENTE RECTIFICADOR

La Figura 4-8a muestra un *punteo rectificador*. El puente rectificador es similar a un rectificador de onda completa porque produce una tensión de salida de onda completa. Los diodos D_1 y D_2 conducen en la mitad positiva del ciclo, y D_3 y D_4 conducen en la mitad negativa del ciclo. Como resultado, la corriente por la carga rectificadora circula durante ambas mitades de los ciclos.

La Figura 4-8b representa el circuito equivalente a la mitad positiva del ciclo. Como se puede ver, D_1 y D_2 están polarizados en directa. Esto produce una tensión positiva en la carga, como se indica por la polaridad más-menos a través de la resistencia de carga. Como ayuda, se visualiza D_2 en corto; entonces, el circuito que queda es un rectificador de media onda, que ya nos es familiar.

En la Figura 4-8c aparece el circuito equivalente para la mitad negativa del ciclo. Esta vez, D_3 y D_4 están polarizados en directa. Esto también pro-

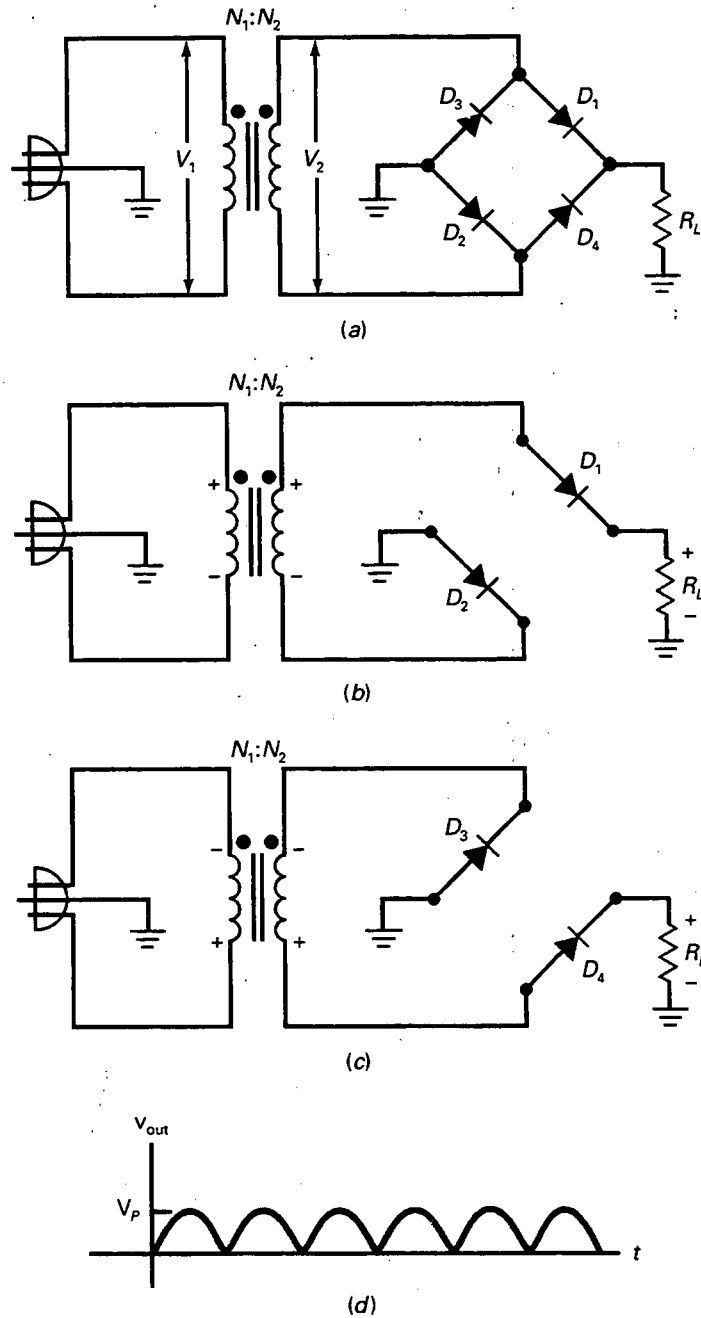


Figura 4-8. a) Puente rectificador; b) circuito equivalente para el semiciclo positivo; c) circuito equivalente para el semiciclo negativo; d) salida de onda completa.

duce una tensión positiva en la carga. Si visualiza D_3 en corto, el circuito parece un rectificador de media onda. Así, el puente rectificador actúa como dos rectificadores de media onda superpuestos.

Durante ambas mitades de los ciclos, la tensión en la carga tiene la misma polaridad y la corriente por la carga circula en la misma dirección. El circuito ha cambiado la tensión de entrada alterna por una tensión de salida continua pulsante como se muestra en la Figura 4-8d. Note la ventaja de este tipo de rectificación de onda completa sobre la versión con conexión central de la sección previa: *la tensión del secundario se usa en su totalidad.*

□ Valor medio y frecuencia de salida

Como un puente rectificador produce una salida de onda completa, las ecuaciones para el valor medio y la frecuencia de salida son las mismas que para el rectificador de onda completa:

$$V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi}$$

y

$$f_{out} = 2f_{in}$$

El valor medio es 63,6 por 100 del valor de pico, y la frecuencia de salida es 120 Hz, dada una frecuencia de línea de 60 Hz.

Una ventaja de un puente rectificador es que toda la tensión del secundario se usa como entrada al rectificador. Dado el mismo transformador, obtenemos el doble de la tensión de pico y el doble de la tensión continua con un rectificador de puente respecto a un rectificador de onda completa. Duplicar la tensión de salida continua compensa el uso de dos diodos extra. Por regla general, se verá el puente rectificador usado muchas más veces que el rectificador de onda completa.

El rectificador de onda completa se usó por muchos años antes de que apareciera el puente rectificador. Por esta razón, ha mantenido el nombre de rectificador de onda completa incluso aunque el puente rectificador tiene una salida de onda completa. Para distinguir el rectificador de onda completa del puente rectificador, en la bibliografía se pueden referir a un rectificador de onda completa como un rectificador de onda completa convencional, un rectificador de onda completa de dos diodos, o un rectificador de onda completa con conexión central.

□ Segunda aproximación y otras pérdidas

Como el puente rectificador tiene dos diodos en el camino de conducción, la tensión de pico viene dada por:

$$2.^{\circ} \text{ puente: } V_{p(out)} = V_{p(in)} - 1,4 \text{ V} \quad (4-8)$$

Como se puede observar, se han extraído dos caídas de diodo al pico para obtener un valor de tensión de pico en la carga un poco más preciso. La Tabla 4-1 resume los tres rectificadores y sus propiedades.

Tabla 4-1. Rectificadores sin filtro*

	Media onda	Onda completa	Puente
Número de diodos	1	2	4
Entrada del rectificador	$V_{p(2)}$	$0,5V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$
Salida de pico (ideal)	$V_{p(2)}$	$0,5V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$
Salida de pico (2. ^a)	$V_{p(2)} - 0,7 \text{ V}$	$0,5V_{p(2)} - 0,7 \text{ V}$	$V_{p(2)} - 1,4 \text{ V}$
Salida en continua	$V_{p(out)}/\pi$	$2V_{p(out)}/\pi$	$2V_{p(out)}/\pi$
Frecuencia de rizado	f_{in}	$2f_{in}$	$2f_{in}$

* $V_{p(2)}$ = tensión de pico en el secundario; $V_{p(out)}$ = tensión de pico en la salida.

EJEMPLO 4-5

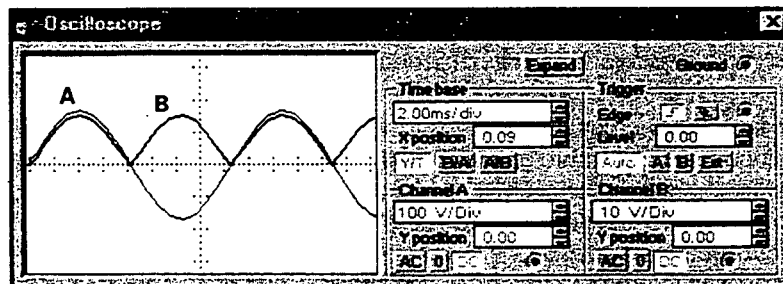
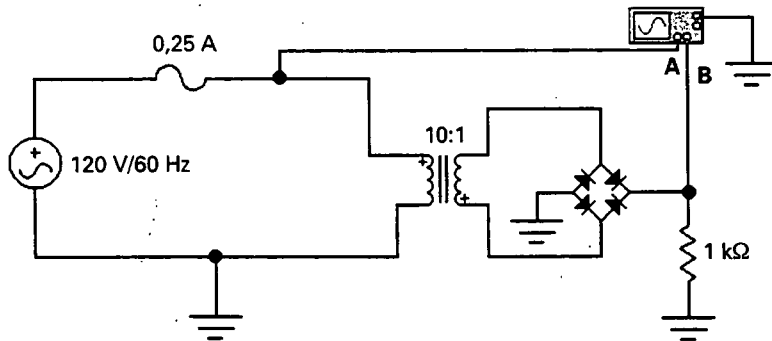
Calcular el pico de la tensión de entrada y salida en la Figura 4-9. Después comparar los resultados teóricos con los medidos.

SOLUCIÓN

Las tensiones de pico en el primario y secundario son las mismas que el Ejemplo 4-3:

$$V_{p(1)} = 170 \text{ V}$$

$$V_{p(2)} = 17 \text{ V}$$

**Figura 4-9.** Ejemplo de laboratorio de un puente rectificador.

Con un puente rectificador se usa toda la tensión del secundario como entrada al rectificador. Idealmente, la tensión de pico de salida es:

$$V_{p(out)} = 17 \text{ V}$$

En una segunda aproximación:

$$V_{p(out)} = 17 \text{ V} - 1,4 \text{ V} = 15,6 \text{ V}$$

Ahora, comparemos los valores teóricos con los medidos. La sensibilidad del canal A es 100 V/Div. Como la entrada sinusoidal ocupa aproximadamente 1,7 Div, su valor de pico es aproximadamente 170 V. El canal B tiene una sensibilidad de 10 V/Div. Como la salida de media onda ocupa aproximadamente 1,6 Div, su valor de pico es aproximadamente 16 V. Ambas lecturas de entrada y salida son aproximadamente iguales a sus valores teóricos.

4-5. EL FILTRO DE CHOQUE

En el pasado, el filtro de choque se empleaba frecuentemente para filtrar la salida de un rectificador. Aunque se ha dejado de usar, por razón de su coste, tamaño y peso, este tipo de filtro tiene valor didáctico y ayuda a comprender más fácilmente otros filtros.

□ Idea básica

El filtro que se muestra en la Figura 4-10a se denomina filtro de choque. La fuente alterna produce una corriente en la bobina, condensador y resistencia. La corriente alterna en cada componente depende de la reactancia inductiva, de la reactancia del condensador y de la resistencia. La bobina tiene una reactancia dada por:

$$X_L = 2\pi fL$$

El condensador tiene una reactancia dada por:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Como se estudió en cursos pasados, la bobina tiene la característica principal de oponerse al cambio en la corriente. Debido a ello, un filtro de choque reduce la corriente alterna en la resistencia de carga a cero. En una segunda aproximación, reduce la corriente por la carga alterna a un valor muy pequeño. Descubramos por qué.

El primer requisito de un filtro de choque bien diseñado consiste en que X_C a la frecuencia de entrada sea mucho menor que R_L . Cuando esta condición se satisface, podemos ignorar la resistencia de carga y usar el circuito

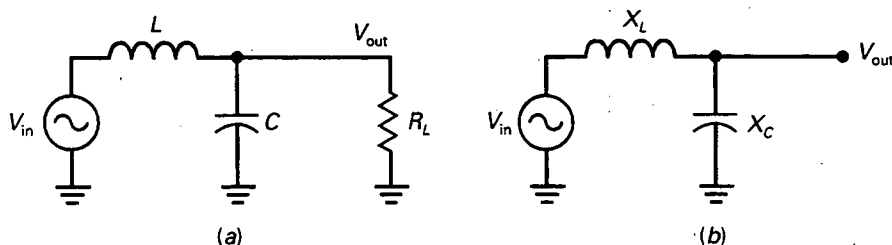


Figura 4-10. a) Filtro de choque; b) circuito equivalente de alterna.

equivalente de la Figura 4-10b. El segundo requisito de un filtro de choque bien diseñado consiste en que X_L sea mayor que X_C a la frecuencia de entrada. Cuando se cumple esta condición, la tensión de salida alterna se aproxima a cero. Por otro lado, como el choque se aproxima a un cortocircuito a 0 Hz y el condensador se asemeja a un circuito abierto a 0 Hz, la corriente continua puede pasar a la resistencia de carga con pocas pérdidas.

En la Figura 4-10b, el circuito actúa como un divisor de tensión reactivo. Cuando X_L es mucho mayor que X_C , casi toda la tensión alterna cae a través del choque. En este caso, la tensión de salida alterna es igual a:

$$V_{out} \approx \frac{X_C}{X_L} V_{in} \quad (4-9)$$

Por ejemplo, si $X_L = 10 \text{ k}\Omega$, $X_C = 100 \Omega$ y $V_{in} = 15 \text{ V}$, la tensión de salida alterna es:

$$V_{out} \approx \frac{100 \Omega}{10 \text{ k}\Omega} 15 \text{ V} = 0,15 \text{ V}$$

En este ejemplo, el filtro de choque reduce la tensión alterna por un factor de 100.

□ Filtrando la salida de un rectificador

La Figura 4-11a muestra un filtro de choque entre un rectificador y una carga. El rectificador puede ser del tipo de media onda, onda completa o puente. ¿Qué efecto tiene el filtro de choque en tensión de carga? La forma más fácil de resolver este problema consiste en usar el teorema de superposición. Recordemos que este teorema dice: *si tienes dos o más fuentes, analiza el circuito para cada fuente separadamente y después añade las tensiones individuales para obtener la tensión total.*

La salida del rectificador tiene dos componentes diferentes: una tensión continua (el valor medio) y una tensión alterna (la parte fluctuante), como aparece en la Figura 4-11b. Cada una de estas tensiones actúa como una fuente separada. Por lo que concierne a la tensión alterna, X_L es mucho mayor que X_C , y esto resulta en una tensión alterna muy pequeña a través de la resistencia de carga. Incluso aunque la componente alterna no sea una

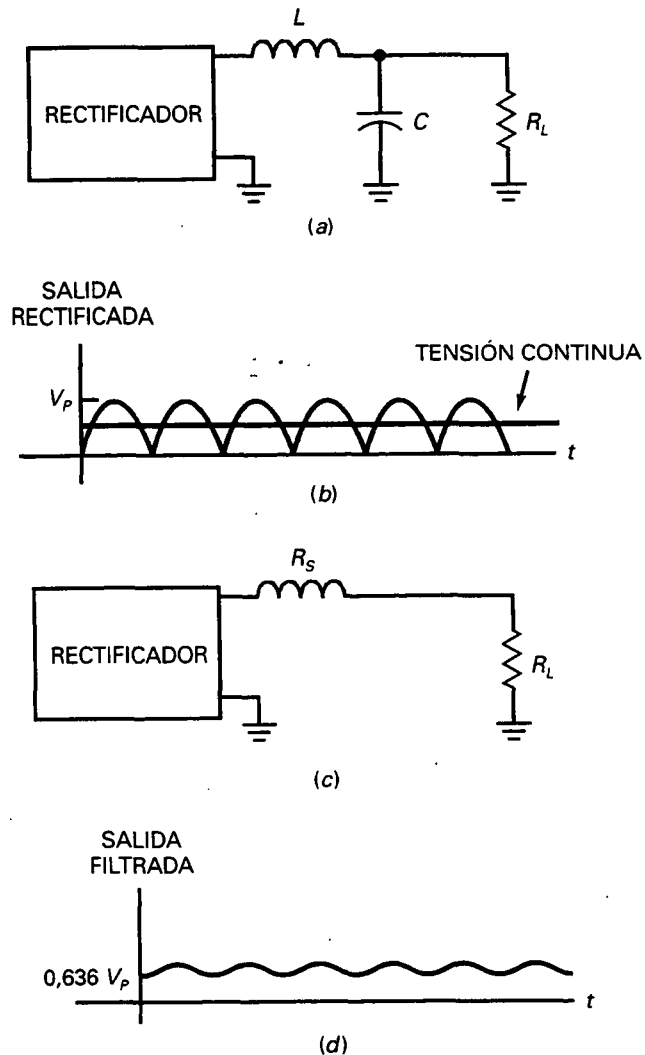


Figura 4-11. a) Rectificador con filtro de choque; b) la salida del rectificador tiene componentes de alterna y de continua; c) circuito equivalente de continua; d) la salida del filtro es la corriente directa con un pequeño rizado.

onda sinusoidal pura, la Ecuación (4-9) todavía es una buena aproximación para la tensión alterna en la carga.

El circuito funciona como en la Figura 4-11c en lo referente a la tensión continua. A 0 Hz, la reactancia inductiva es cero y la reactancia capacitiva es infinita. Sólo permanecen las resistencias en serie de los arrollamientos de la bobina. Haciendo R_s mucho menor que R_L provoca que la mayor parte de la componente continua aparezca a través de la resistencia de carga.

Así es como funciona un filtro de choque: casi toda la componente continua se pasa a la resistencia de carga, y casi toda la componente alterna se bloquea. De esta forma, obtenemos una tensión alterna casi perfecta, ya que

es prácticamente constante, como la tensión que sale de una batería. La Figura 4-11d muestra la salida filtrada para una señal de onda completa. La única desviación de una tensión continua perfecta es la pequeña tensión continua alterna en la carga mostrada en la Figura 4-11d. Esta pequeña tensión alterna en la carga se denomina rizado. Podemos medir su valor de pico a pico con un osciloscopio.

❑ **Principal desventaja**

Una fuente de alimentación es el circuito, dentro de los equipos electrónicos, que convierte la tensión de entrada alterna en una tensión de salida continua casi perfecta. Incluye un rectificador y un filtro. Hoy en día la tendencia es ir hacia fuentes de alimentación de bajo voltaje y corriente grande.

Como la frecuencia de red es sólo de 60 Hz, se tienen que usar inductancias grandes para obtener suficiente reactancia para un filtrado adecuado. Pero las bobinas grandes tienen resistencias de arrollamiento elevadas. Todo ello crea serios problemas de diseño con corrientes de carga considerables. En otras palabras, cae demasiada tensión continua a través de la resistencia de choque. Además, las bobinas grandes no son adecuadas para los circuitos semiconductores modernos, para los que se pone mucho énfasis en los diseños ligeros.

❑ **Reguladores conmutados**

Existe una aplicación importante para los filtros de choque. Un regulador conmutado es un tipo especial de fuente de alimentación usada en ordenadores, monitores y una creciente variedad de equipos. La frecuencia empleada en un regulador conmutado es mucho mayor que 60 Hz. Típicamente la frecuencia que se filtra está por encima de 20 kHz. A esta frecuencia mucho más elevada, podemos usar bobinas más pequeñas para diseñar filtros de choque eficientes. Los detalles se discutirán en un capítulo posterior.

4-6. EL FILTRO CON CONDENSADOR A LA ENTRADA

El filtro de choque produce una tensión de salida continua igual al valor medio de la tensión rectificada. El filtro con condensador a la entrada genera una tensión de salida continua igual al valor de pico de la tensión rectificada. Este tipo de filtros es el más usado en fuentes de alimentación.

❑ **Idea básica**

La Figura 4-12a muestra una fuente alterna, un diodo y un condensador. La clave para entender un filtro con condensador a la entrada consiste en comprender lo que hace este circuito simple durante el primer cuarto de ciclo.

Inicialmente, el condensador está descargado. Si observamos la Figura 4-12b, durante el primer cuarto de ciclo el diodo está polarizado en directa. Dado que idealmente funciona como un circuito cerrado, el condensador

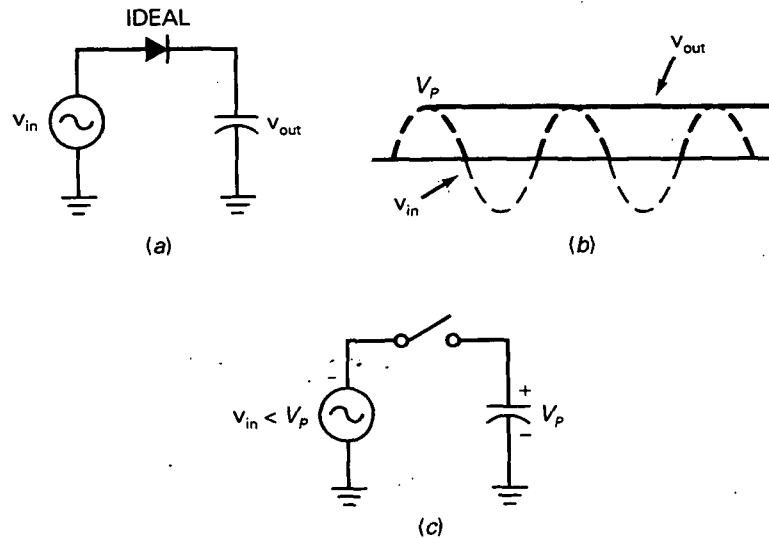


Figura 4-12. a) Filtro con condensador a la entrada sin carga; b) la salida es tensión continua pura; c) el condensador permanece cargado cuando el diodo no conduce.

se carga, y su tensión se iguala a la tensión de fuente en cada instante del primer cuarto de ciclo. La carga continúa hasta que la entrada alcanza su máximo valor. En este punto, la tensión del condensador es igual a V_p .

Después de que la tensión de entrada alcanza el pico, empieza a disminuir. Tan pronto como la tensión de entrada sea menor que V_p , el diodo deja de conducir. En este caso, actúa como el interruptor abierto de la Figura 4-12c. Durante los ciclos siguientes, el condensador permanece totalmente cargado y el diodo abierto. Esta es la razón de que la tensión a la salida en la Figura 4-12b sea constante e igual a V_p .

Idealmente, todo lo que hace el filtro con condensador a la entrada es cargar el condensador a la tensión de pico durante el primer cuarto de ciclo. Esta tensión de pico es constante, la tensión continua perfecta que necesitamos para los equipos electrónicos. Sólo existe un problema: no hay resistencia de carga.

□ Efecto de la resistencia de carga

Para que el filtro con condensador a la entrada sea útil, necesitamos conectar una resistencia de carga a través del condensador, como se muestra en la Figura 4-13a. Mientras la constante de tiempo $R_L C$ sea mucho mayor que el período, el condensador permanece casi totalmente cargado y la tensión en la carga es aproximadamente V_p . La única desviación de la tensión perfecta es el pequeño rizado que se ve en la Figura 4-13b. Cuanto menor sea el valor de pico a pico de este rizado, mejor se aproximará la salida a una tensión continua perfecta.

Entre picos, el diodo está apagado y el condensador se descarga a través de la resistencia de carga; en otras palabras, el condensador suministra la

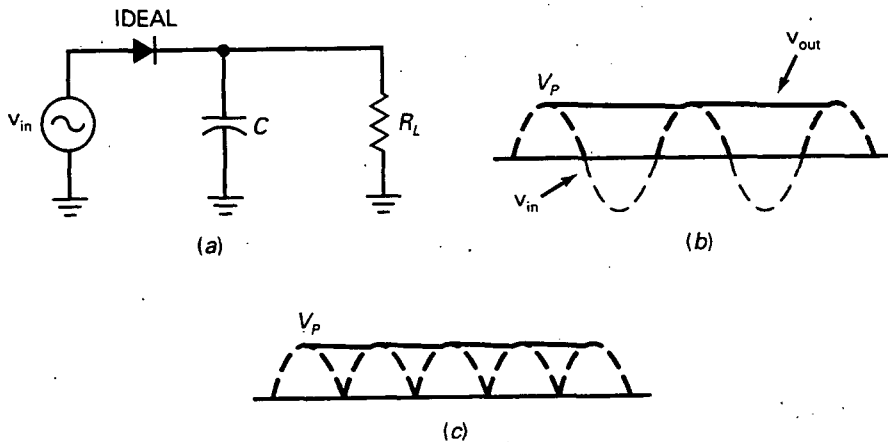


Figura 4-13. a) Filtro con condensador a la entrada con carga; b) la salida es la corriente directa con un pequeño rizado; c) la onda completa de salida tiene menos rizado.

corriente a la carga. Como el condensador se descarga sólo ligeramente entre picos, el rizado de pico a pico es pequeño. Cuando llega el siguiente pico, el diodo conduce brevemente y recarga el condensador al valor de pico. Una cuestión clave es: ¿qué tamaño debería tener el condensador para operar apropiadamente? Antes de discutir el tamaño del condensador consideremos lo que sucede con los otros circuitos rectificadores.

□ Filtro de onda completa

Si conectamos un puente rectificador a un filtro de choque, el rizado de pico a pico se corta por la mitad. La respuesta la encontramos en la Figura 4-13a. Cuando una tensión de onda completa se aplica a un circuito RC, el condensador se descarga sólo la mitad del tiempo. Por lo tanto, el rizado de pico a pico tiene la mitad de tamaño que tendría con un rectificador de onda completa.

□ La fórmula del rizado

Aquí tenemos una derivación que usaremos para estimar el rizado de pico a pico de cualquier filtro con condensador a la entrada:

$$V_R = \frac{I}{fC} \quad (4-10)$$

donde:

- V_R = tensión de rizado de pico a pico
- I = corriente por la carga en continua
- f = frecuencia de rizado
- C = capacidad

Esto es una aproximación, no una derivación exacta. Podemos usar esta fórmula para estimar el rizado de pico a pico. Cuando se necesite una respuesta más precisa, una solución consiste en usar un ordenador con un simulador de circuitos como EWB.

Por ejemplo, si la corriente por la carga en continua es 10 mA y la capacidad es 20 μF , el rizado con un puente rectificador y un filtro con condensador a la entrada es:

$$V_R = \frac{10 \text{ mA}}{(120 \text{ Hz})(20 \mu\text{F})} = 0,417 \text{ V pp}$$

Cuando se use esta derivación, han de recordarse dos cosas. Primero, el rizado es una tensión de pico a pico (pp). Esto es útil porque normalmente medimos tensiones de rizado con un osciloscopio. Segundo, la fórmula es válida con tensiones de media onda y de onda completa. Se utiliza 50 Hz para media onda y 100 Hz para onda completa.

Debería usarse un osciloscopio para las medidas de rizado si éste está disponible. Si no, usted puede usar un voltímetro de alterna, aunque habrá un error significativo en la medida. La mayoría de los voltímetros de alterna están calibrados para leer valores rms de una onda sinusoidal. Como el rizado no es una onda sinusoidal, puede obtener un error de medida como mucho del 25 por 100, dependiendo del diseño del voltímetro de alterna. Pero esto no debería ser un problema cuando estamos detectando averías, ya que estamos buscando cambios de rizado mucho mayores.

Si usted efectivamente usa un voltímetro de alterna para medir el rizado, puede convertir el valor de pico a pico dado por la Ecuación (4-10) a un valor rms usando la siguiente fórmula para una onda sinusoidal:

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{pp}}}{2\sqrt{2}}$$

Dividiendo por 2 se convierte el valor de pico a pico a un valor de pico, y haciéndolo por $\sqrt{2}$ da el valor de rms de una onda sinusoidal con el mismo valor de pico a pico que la tensión de rizado.

□ Tensión continua en la carga

Es difícil calcular la tensión continua en la carga en un puente rectificador con filtro con condensador a la entrada. Para empezar, tenemos las caídas de tensión de los dos diodos que se restan a la tensión de pico. Además de las caídas en los diodos ocurre una caída de tensión adicional que es la siguiente: los diodos conducen fuertemente cuando se recarga el condensador porque están en directa sólo un corto período de tiempo durante cada ciclo.

Esta corriente breve pero grande tiene que circular a través de los arrollamientos del transformador y la resistencia interna de los diodos. En nuestros ejemplos, calcularemos tanto la salida ideal como la salida con la segunda aproximación de un diodo, recordando que la tensión continua real es ligeramente inferior.

EJEMPLO 4-6

¿Cuál es la tensión en la carga en continua y el rizado en la Figura 4-14?

SOLUCIÓN

La tensión rms del secundario es:

$$V_2 = \frac{120 \text{ V}}{5} = 24 \text{ V}$$

La tensión de pico del secundario vale:

$$V_p = \frac{24 \text{ V}}{0,707} = 34 \text{ V}$$

Suponiendo un diodo ideal y un rizado pequeño, la tensión en la carga continua es:

$$V_L = 34 \text{ V}$$

Para calcular el rizado, primero necesitamos obtener la corriente por la carga en continua:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{34 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 6,8 \text{ mA}$$

Ahora podemos usar la Ecuación (4-10) para obtener:

$$V_r = \frac{6,8 \text{ mA}}{(60 \text{ Hz})(100 \mu\text{F})} = 1,13 \text{ V pp} \approx 1,1 \text{ V pp}$$

Redondeamos el rizado a dos dígitos significativos porque es una aproximación y no puede ser medido con un osciloscopio de precisión mayor.

Así es como mejoramos la respuesta ligeramente: hay alrededor de 0,7 V a través del diodo de silicio cuando está conduciendo.

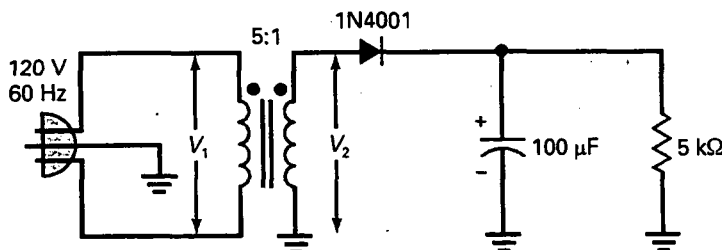


Figura 4-14. Rectificador de media onda y filtro con condensador a la entrada.

Por tanto, la tensión de pico está más cercana a 33.3 V que a 34 V. El rizado también reduce la tensión de continua ligeramente. Así que la tensión en la carga en continua real estará más cercana a 33 V que a 34 V. Pero estas son desviaciones menores. Las respuestas ideales son normalmente adecuadas para detección de averías y análisis preliminares.

Un comentario final sobre el circuito. El signo positivo del filtro indica un condensador polarizado, uno cuyo lado positivo debe estar conectado a la salida positiva del rectificador. En la Figura 4-15, el signo positivo del condensador está correctamente conectado a la tensión de salida positiva. Debe mirar con cuidado el encapsulado del condensador cuando está construyendo un circuito o detectando averías para averiguar si está polarizado o no.

Las fuentes de alimentación a menudo usan condensadores electrolíticos polarizados porque este tipo puede producir valores altos de capacidad en encapsulados pequeños. Como se discutió en cursos anteriores, los electrolíticos deben estar conectados con la polaridad correcta para producir la película de óxido. Si un condensador electrolítico se conecta con polaridad opuesta se calienta y puede explotar.

EJEMPLO 4-7

¿Cuál es la tensión continua en la carga y el rizado en la Figura 4-15?

SOLUCION

Como el transformador es un reductor 5:1, igual que en el ejemplo precedente, la tensión de pico del secundario sigue siendo 34 V. La mitad de esta tensión es la entrada a cada sección de media onda. Suponiendo un diodo ideal, la tensión en la carga en continua es:

$$V_L = 17 \text{ V}$$

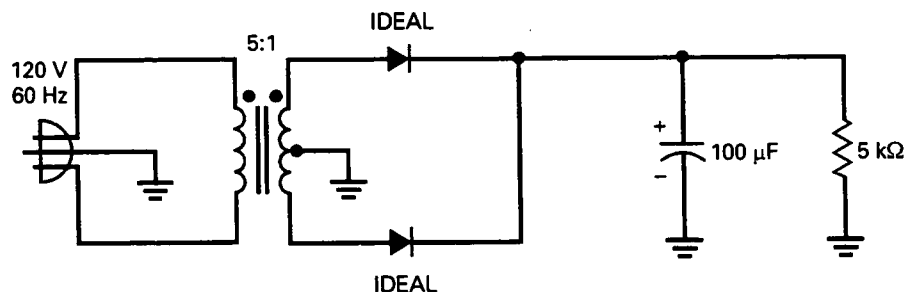


Figura 4-15. Rectificador de onda completa y filtro con condensador a la entrada.

La corriente por la carga en continua es:

$$I_L = \frac{17 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 3,4 \text{ mA}$$

Ahora, la Ecuación (4-10) da:

$$V_R = \frac{3,4 \text{ mA}}{(120 \text{ Hz})(100 \mu\text{F})} = 0,283 \text{ V pp} \approx 0,28 \text{ V pp}$$

A causa de los 0,7 V a través del diodo conduciendo, la tensión en la carga en continua real estará más cercana a 16 V que a 17 V.

EJEMPLO 4-8

¿Cuál es la tensión en la carga en continua y el rizado en la Figura 4-16? Compare las respuestas con las obtenidas en los dos ejemplos precedentes.

SOLUCIÓN

Como el transformador es reductor 5:1, igual que en el ejemplo precedente, la tensión de pico en el secundario sigue siendo 34 V. Suponiendo un diodo ideal y un rizado pequeño, la tensión en la carga en continua es:

$$V_L = 34 \text{ V}$$

La corriente por la carga en continua vale:

$$I_L = \frac{34 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega} = 6,8 \text{ mA}$$

Ahora, la Ecuación (4-10) da:

$$V_R = \frac{6,8 \text{ mA}}{(120 \text{ Hz})(100 \mu\text{F})} = 0,566 \text{ V pp} \approx 0,57 \text{ V pp}$$

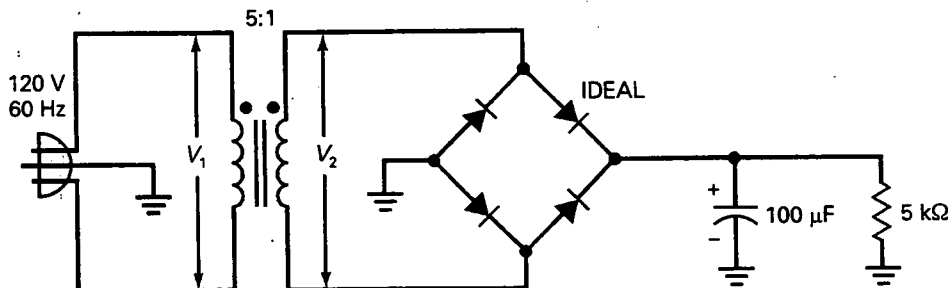


Figura 4-16. Puente rectificador y filtro con condensador a la entrada.

A causa de los 1,4 V a través de los dos diodos conduciendo y el rizado, la tensión en la carga en continua real estará más cercana a 32 V que a 34 V.

Hemos calculado la tensión en la carga en continua y el rizado para los tres rectificadores diferentes. Aquí están los resultados:

Media onda: 34 V y 1,13 V

Onda completa: 17 V y 0,288 V

Puente: 34 V y 0,566 V

Para un transformador dado, el puente rectificador es mejor que el rectificador de media onda porque tiene menos rizado, y es mejor que el rectificador de onda completa porque produce el doble de tensión de salida. De los tres, el *puente rectificador se ha convertido en el más popular.*

EJEMPLO 4-9

La Figura 4-17 muestra los valores medidos con un simulador de ordenador. Calcule las tensiones de carga teóricas y el rizado y compárelas con los valores medidos.

SOLUCIÓN

El transformador es un reductor 15 : 1, así que la tensión rms en el secundario es:

$$V_2 = \frac{120 \text{ V}}{15} = 8 \text{ V}$$

Y la tensión de pico del secundario:

$$V_p = \frac{8 \text{ V}}{0,707} = 11,3 \text{ V}$$

Usamos la segunda aproximación de los diodos para obtener la tensión en la carga en continua:

$$V_L = 11,3 \text{ V} - 1,4 \text{ V} = 9,9 \text{ V}$$

Para calcular el rizado primero necesitamos obtener la corriente por la carga en continua:

$$I_L = \frac{9,9 \text{ V}}{500 \Omega} = 19,8 \text{ mA}$$

Ahora, podemos usar la Ecuación (4-10) para obtener:

$$V_R = \frac{19,8 \text{ mA}}{(120 \text{ Hz})(4,700 \mu\text{F})} = 35 \text{ mV pp}$$

En la Figura 4-17, un polímetro lee una tensión en la carga en continua de 9,6994 V, que está cerca del teórico 9,9 V. La ligera diferencia se debe a las caídas de tensión en los arrollamientos del transformador, resistencias internas, etc.

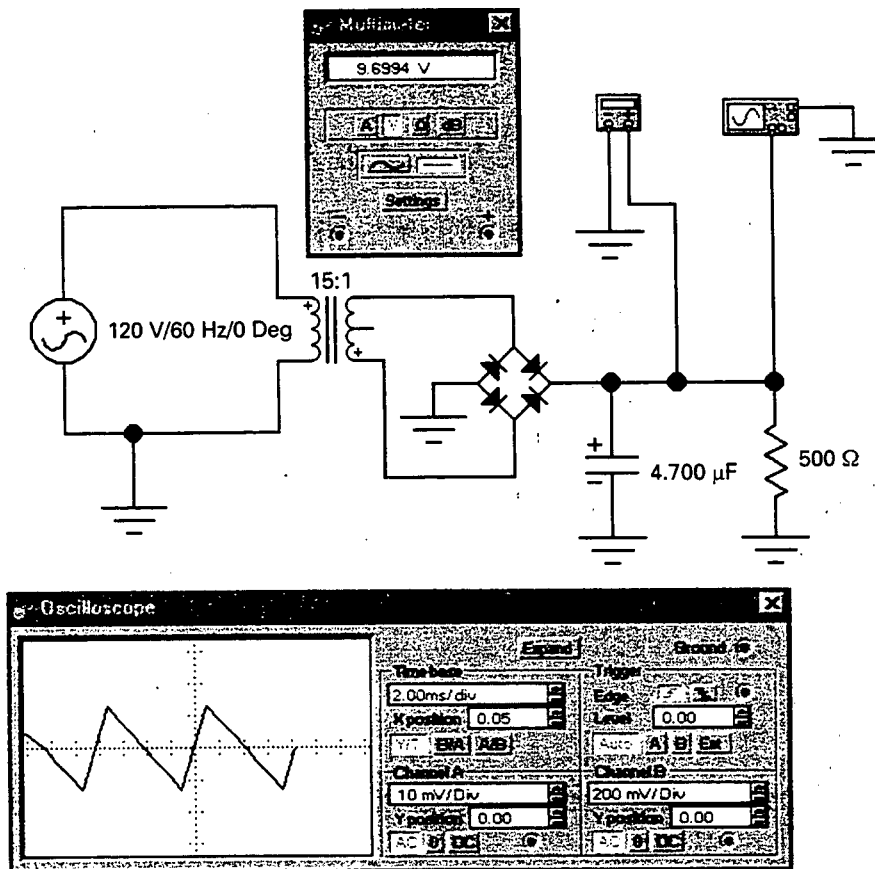


Figura 4-17. Ejemplo del laboratorio de un puente rectificador y filtro con condensador para entrada.

El canal A del osciloscopio se coloca a 10 mV/Div. El rizado de pico a pico es aproximadamente 2.6 Div, así que el rizado medido es 26 mV. Esto es menos que el valor teórico de 35 mV, lo que destaca el comentario realizado anteriormente. La Ecuación (4-10) se usa para estimar el rizado. Si necesita más precisión use un ordenador.

4-7. TENSIÓN INVERSA DE PICO Y CORRIENTE INICIAL

La **tensión inversa de pico** (PIV: *Peak Inverse Voltage*) es la **tensión máxima a través del diodo que no conduce de un rectificador**. Esta tensión debe ser menor que la tensión de ruptura del diodo; de otro modo, el diodo se destruirá. La tensión inversa de pico depende del tipo de rectificador y filtro. El peor caso sucede con el filtro con condensador a la entrada.

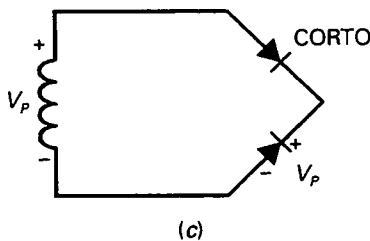
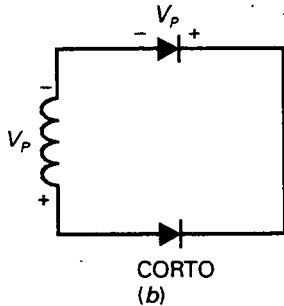
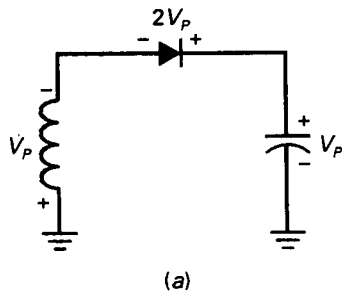


Figura 4-18. a) Tensión inversa de pico en un rectificador de media onda; b) tensión inversa de pico en un rectificador de onda completa; c) tensión inversa de pico en un puente rectificador.

Como discutimos antes, las hojas de características de muchos fabricantes usan una variedad de símbolos para indicar la máxima tensión inversa. Algunas veces estos símbolos indican condiciones diferentes de medida. Algunos de los símbolos de las hojas de características para la tensión inversa máxima son PIV, PRV, V_B , V_{BR} , V_R , V_{RRM} , V_{RWM} y $V_{R(máx)}$.

□ Rectificador de media onda con filtro con condensador a la entrada

La Figura 4-18a muestra la parte crítica de un rectificador de media onda. Ésta es la parte del circuito que determina cuánta tensión inversa pasa a través del diodo. El resto del circuito no tiene efecto y se omite para ganar claridad. En el peor caso, la tensión de pico del secundario está en el pico negativo y el condensador está completamente cargado con una tensión V_p . Aplique la ley de tensión de Kirchhoff y verá rápidamente que la tensión inversa de pico a través del diodo que no conduce es:

$$PIV = 2V_p \quad (4-11)$$

Por ejemplo, si la tensión de pico en el secundario es 15 V, la tensión inversa de pico es 30 V. Mientras la tensión de ruptura del diodo sea mayor que esto, no se dañará.

□ Rectificador de onda completa con filtro con condensador a la entrada

La Figura 4-18b muestra la parte esencial de un rectificador de onda completa que se necesita para calcular la tensión inversa de pico. De nuevo, la tensión del secundario está en el pico negativo. En este caso el diodo inferior actúa como un cortocircuito y el diodo superior está abierto. La ley de Kirchhoff implica:

$$PIV = V_p \quad (4-12)$$

□ Puente rectificador con filtro con condensador a la entrada

La Figura 4-18d muestra parte de un puente rectificador. Esto es todo lo que necesitamos para calcular la tensión inversa de pico. Como el diodo superior está en corto y el inferior está abierto, la tensión inversa de pico a través del diodo inferior es:

$$PIV = V_p \quad (4-13)$$

Otra ventaja del puente rectificador es que tiene la tensión inversa de pico más baja para una tensión en la carga dada. Para producir la misma tensión en la carga, el rectificador de onda completa necesitaría el doble de tensión en el secundario.

❑ Corriente inicial

Antes de que el circuito se conecte, el condensador del filtro está descargado. En el instante en que se aplica tensión, el condensador descargado actúa como un cortocircuito. Por tanto, la corriente inicial del condensador, al cargarse, puede ser muy grande. Todo lo que hay en el camino de carga que pueda impedir el paso de la corriente es la resistencia de los arrollamientos del transformador y la resistencia interna de los diodos. Al impulso de corriente que circula cuando se enciende el circuito se le llama *corriente inicial*.

Normalmente, el diseñador de la fuente de alimentación debe asegurarse de que el diodo que emplee puede soportar la corriente inicial. La clave, en este caso, es la capacidad del condensador del filtro. Ocasionalmente, un diseñador puede decidir usar una resistencia inicial en lugar de otro diodo.

La Figura 4-19 ilustra esta idea. Una pequeña resistencia se inserta entre el puente rectificador y el filtro con condensador. Sin la resistencia, la corriente inicial podría destruir los diodos. Incluyendo la resistencia inicial el diseñador reduce la corriente inicial a un nivel seguro. Las resistencias iniciales no se usan con frecuencia y se mencionan sólo por si se las encuentra en una fuente de alimentación.

EJEMPLO 4-10

¿Cuál es la tensión inversa de pico en la Figura 4-19 si la relación de espiras es 8? Un 1N4001 tiene una tensión de ruptura de 50 V.
¿Es seguro utilizar un 1N4001 en este circuito?

SOLUCIÓN

La tensión rms en el secundario es:

$$V_2 = \frac{120 \text{ V}}{8} = 15 \text{ V}$$

La tensión de pico en el secundario es:

$$V_p = \frac{15 \text{ V}}{0,707} = 21,2 \text{ V}$$

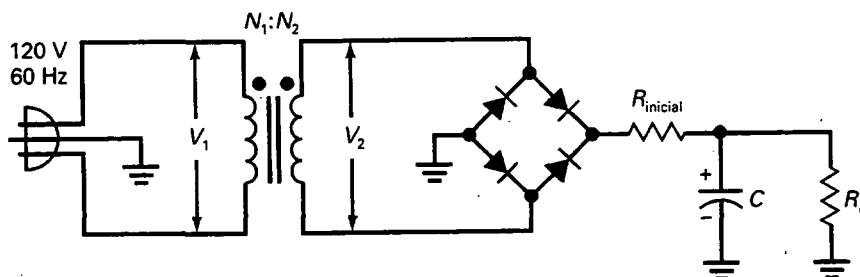
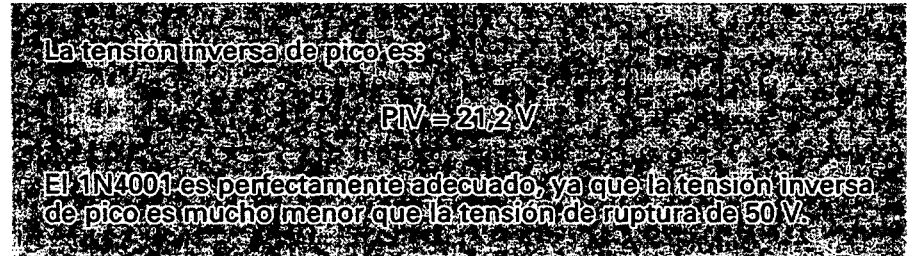


Figura 4-19. La resistencia inicial limita la corriente inicial.



4-8. MÁS SOBRE FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Ya tiene una idea básica sobre cómo funcionan las fuentes de alimentación. En las secciones precedentes se ha visto cómo se rectifica y filtra una tensión alterna para tener una tensión continua. Hay unas pocas ideas adicionales que debe conocer.

☐ Transformadores comerciales

El uso de relaciones de espiras con transformadores se aplica sólo a los transformadores ideales. Los transformadores con núcleo de hierro son diferentes. En otras palabras, los transformadores que se compran en una tienda no son ideales, ya que los arrollamientos tienen resistencias que producen pérdidas de potencia. Además, el núcleo laminado tiene corrientes parásitas que producen una mayor pérdida de potencia. Como consecuencia de estas pérdidas no deseadas de potencia, la relación de espiras es sólo una aproximación. De hecho, las hojas de características de los transformadores rara vez incluyen la relación de espiras. Por lo general, lo único que indican es la tensión en el secundario para una corriente especificada.

Por ejemplo, la Figura 4-20a muestra un F-25X, un transformador industrial cuya hoja de características proporciona sólo los siguientes datos: para una tensión alterna en el primario de 115 V, la tensión alterna en el secundario es de 12,6 V cuando la corriente en el secundario es de 1,5 A. Si la corriente en el secundario es menor que 1,5 A en la Figura 4-20a, la tensión alterna en el secundario será mayor que 12,6 V debido a la menor pérdida de potencia en el arrollamiento y núcleo laminado.

Cuando se necesite conocer la corriente del primario, puede estimarse la relación de espiras de un transformador real usando esta definición:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (4-14)$$

Por ejemplo, el F-25X tiene $V_1 = 115$ V y $V_2 = 12,6$ V. La relación de espiras con la corriente por la carga límite de 1,5 A es:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{115}{12,6} = 9,13$$

Esto es una aproximación, porque la relación de espiras calculada decrece cuando la corriente por la carga decrece.

□ Calculando la corriente por el fusible

Cuando se detectan averías puede ser necesario calcular la corriente en el primario para determinar si un fusible es el adecuado. La forma más fácil de hacer esto con un transformador real consiste en suponer que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida: $P_{in} = P_{out}$. Por ejemplo, la Figura 4-20b muestra un transformador con un fusible alimentando a un rectificador con filtro. ¿Es adecuado el fusible de 0,1 A?

Así es como se estima la corriente del primario cuando se detectan averías. La potencia de salida es igual a la potencia de carga en continua:

$$P_{out} = VI = (15 \text{ V})(1,2 \text{ A}) = 18 \text{ W}$$

Ignore las pérdidas de potencia en el rectificador y el transformador. Como la potencia de entrada debe ser igual a la potencia de salida:

$$P_{in} = 18 \text{ W}$$

Como $P_{in} = V_1 I_1$, podemos calcular la corriente del primario:

$$I_1 = \frac{18 \text{ W}}{115 \text{ V}} = 0,156 \text{ A}$$

Esto es sólo una estimación, porque ignoramos las pérdidas de potencia en el transformador y el rectificador. La corriente de primario real será mayor en un 5-20 por 100 a causa de estas pérdidas adicionales. En cualquier caso, el fusible es inadecuado. Debería ser al menos de 0,25 A.

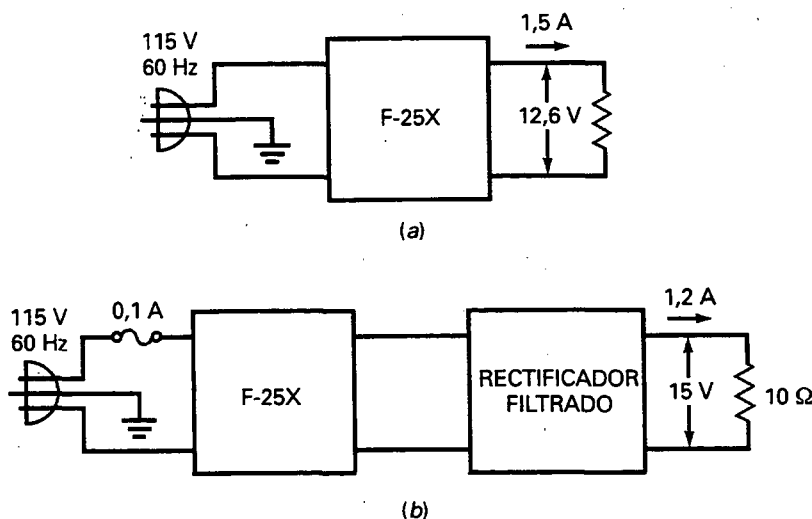


Figura 4-20. a) Límites en un transformador real; b) calculando la corriente por el fusible.

❑ Fusibles de fundido lento

Suponga que en la Figura 4-20b se usa un filtro con condensador a la entrada. Si un fusible ordinario de 0,25 A se usa en la Figura 4-20b, se fundirá cuando se dé potencia al circuito. La razón es la corriente inicial descrita anteriormente. La mayoría de las fuentes de alimentación usan fusibles de fundido lento, unos que temporalmente soportan sobrecargas de corriente. Por ejemplo, un fusible de fundido lento de 0,25 A puede soportar:

- 2 A durante 0,1 segundos,
- 1,5 A durante 1 segundo,
- 1 A durante 2 segundos,

y así sucesivamente. Con un fusible de fundido lento el circuito tiene tiempo de cargar el condensador. Después, la corriente del primario cae a su nivel normal y el fusible estará todavía intacto.

❑ Calculando la corriente del diodo

Tanto si un rectificador de media onda se filtra como si no, la corriente media a través del diodo tiene que igualar a la corriente por la carga en continua porque sólo hay un camino para la corriente. Como derivación:

$$\text{Media onda: } I_{\text{diodo}} = I_{\text{dc}} \quad (4-15)$$

Por otro lado, la corriente media a través de un diodo en el rectificador de onda completa es igual sólo a la mitad de la corriente por la carga en continua porque hay dos diodos en el circuito compartiendo la carga. Similarmente, cada diodo en un puente rectificador tiene que soportar una corriente media de la mitad de la corriente por la carga en continua. Como derivación:

$$\text{Onda completa: } I_{\text{diodo}} = 0,5I_{\text{dc}} \quad (4-16)$$

La Tabla 4-2 resume las propiedades de los tres rectificadores con filtro con condensador a la entrada.

❑ Leyendo una hoja de características

Diríjase a la hoja de características del 1N4001 en el Apéndice. La tensión inversa repetitiva de pico, designada con V_{RRM} en la hoja de características, es la misma que la tensión inversa de pico discutida antes. La hoja de características muestra que el 1N4001 puede soportar una tensión inversa de 50 V.

El valor medio de la corriente en directa rectificada ($I_{F(AV)}$, $I_{(máx)}$, o I_0) es el valor medio de la corriente continua que atraviesa el diodo. Como ya vimos, es igual a la mitad de la corriente continua en la carga para un rectificador de onda completa o puente rectificador. Para rectificadores de media onda, la corriente en el diodo es igual a la corriente continua en la carga. De acuerdo con la hoja de características, el 1N4001 puede tener una corriente

Tabla 4-2. Rectificadores con filtro con condensador a la entrada*

	Media onda	Onda completa	Puente
Número de diodos	1	2	4
Entrada del rectificador	$V_{p(2)}$	$0,5V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$
Salida de continua (ideal)	$V_{p(2)}$	$0,5V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$
Salida de continua (2.ª)	$V_{p(2)} - 0,7 \text{ V}$	$0,5V_{p(2)} - 0,7 \text{ V}$	$V_{p(2)} - 1,4 \text{ V}$
Frecuencia de rizado	f_{in}	$2f_{in}$	$2f_{in}$
PIV	$2V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$	$V_{p(2)}$
Corriente del diodo	I_{dc}	$0,5I_{dc}$	$0,5I_{dc}$

* $V_{p(2)}$ = tensión de pico en el secundario; $V_{p(out)}$ = tensión de pico en la salida;
 I_{dc} = corriente por la carga en continua.

continua de 1 A, lo que significa que la corriente por la carga puede ser como máximo de 2 A en un puente rectificador. Obsérvese también la limitación para el pico de corriente I_{FSM} . Como se indica en la hoja de características, un 1N4001 puede soportar hasta 30 A durante el primer ciclo cuando se enciende el circuito.

□ Filtros RC

Antes de los años setenta se conectaban *filtros pasivos* (componentes R , L y C) entre el condensador del filtro y la carga. Hoy en día raramente se ven filtros pasivos en fuentes de alimentación con semiconductores, pero pueden existir aplicaciones especiales, tales como amplificadores de potencia de audio, en las que se pueden encontrar.

La Figura 4-21a muestra un puente rectificador y un filtro con condensador a la entrada. Normalmente, un diseñador fijará un rizado de pico a pico no superior al 10 por 100 a través del condensador del filtro. La razón para no tratar de obtener un rizado aún menor es que el condensador del filtro sería demasiado grande. Un filtrado adicional se realiza entonces mediante secciones RC entre el condensador del filtro y la resistencia de carga.

Las secciones RC son ejemplos de filtros pasivos, los que usan sólo componentes R , L o C . Por consideraciones de diseño, R debe ser mucho mayor que X_C a la frecuencia del rizado. Por tanto, el rizado se reduce antes de que alcance la resistencia de carga. Comúnmente, R es por lo menos diez veces mayor que X_C , lo que significa que cada sección atenúa el rizado en un factor por lo menos de 10. La desventaja principal del filtro RC es la pérdida de tensión en cada resistencia. Esto quiere decir que el filtro RC es adecuado solamente para cargas pequeñas (corriente por la carga pequeña o resistencia de carga grande).

□ Filtros LC

Cuando la corriente por la carga es grande, los filtros LC de la Figura 4-21b representan una mejora con respecto a los filtros RC . De nuevo, la idea es reducir el rizado a través de los componentes en serie, las bobinas en este

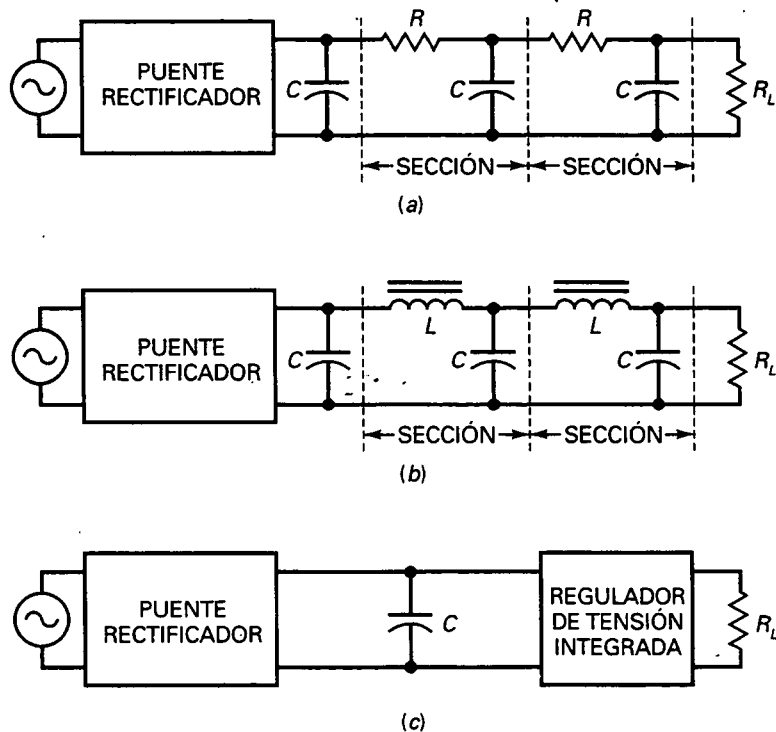


Figura 4-21. a) Filtrado RC; b) filtrado LC; c) filtrado con regulador de tensión.

caso. Esto se logra haciendo X_L mucho mayor que X_C a la frecuencia del rizado. De esta forma, el rizado se puede reducir a niveles extremadamente bajos. Además, la caída de tensión continua en las bobinas es mucho menor que en las secciones RC porque la resistencia de los arrollamientos es menor.

El filtro LC fue popular en su tiempo. En la actualidad se está haciendo obsoleto en fuentes de alimentación típicas debido al tamaño y coste de las bobinas. Para fuentes de alimentación de baja tensión, el filtro LC ha sido sustituido por un *circuito integrado*. Éste es un dispositivo que contiene diodos, transistores, resistencias y otros componentes en un paquete miniaturizado para realizar funciones específicas.

La Figura 4-21c ilustra la idea. Un *regulador de tensión integrado*, que es un tipo de circuito integrado, está entre el condensador del filtro y la resistencia de carga. Este dispositivo no sólo reduce el rizado, también mantiene constante la tensión continua de salida. Explicaremos los reguladores de tensión integrados en un capítulo posterior. Debido a su bajo coste, los reguladores de tensión integrados son ahora el método estándar usado para reducir el rizado.

4-9. DETECCIÓN DE AVERÍAS

Casi todos los equipos electrónicos tienen una fuente de alimentación, típicamente un rectificador delante de un filtro con condensador a la entrada seguido de un regulador de tensión (que se comentará más tarde). La fuente

de alimentación proporciona las tensiones continuas requeridas por los demás dispositivos. Si el funcionamiento del equipo no es el adecuado, lo primero que hay que comprobar es la tensión continua que entrega la fuente de alimentación. Muy frecuentemente, *los fallos de los equipos están causados por problemas en la fuente de alimentación.*

❑ Procedimiento

Se supone que se están detectando averías en el circuito de la Figura 4-22. Puede comenzar midiendo la tensión continua en la carga. Debería ser aproximadamente la misma que la tensión de pico en el secundario. Si no, hay dos posibles caminos a seguir.

Primero, si no hay tensión en la carga se emplea un voltímetro flotante para medir la tensión en el secundario (en la escala de alterna). Esta lectura es la tensión rms del arrollamiento secundario. Convierta esto a valor de pico. Puede estimar el valor de pico añadiendo un 40 por 100 al valor rms. Si éste es normal, los diodos pueden estar defectuosos. Si no hay tensión en el secundario, el fusible puede estar fundido o el transformador defectuoso.

Segundo, si hay tensión continua, pero es menor de lo que debiera, conviene mirar la tensión continua en la carga con un osciloscopio, poniendo atención al rizado. Una tensión de rizado pico a pico de aproximadamente el 10 por 100 de la tensión ideal en la carga es razonable. El rizado puede tener un valor un poco mayor o un poco menor que el indicado, según el diseño. Además, la frecuencia del rizado debe ser de 100 Hz para un rectificador de onda completa o para un puente rectificador. Si el rizado es de 50 Hz uno de los diodos puede estar abierto.

❑ Fallos comunes

Algunos fallos que surgen comúnmente en los puentes rectificadores con filtros con condensador son los siguientes:

1. Si el fusible está abierto no habrá tensión en ningún punto del circuito.
2. Si el condensador del filtro está abierto, la tensión continua en la carga será pequeña, ya que la salida tendrá una señal de onda completa no filtrada.

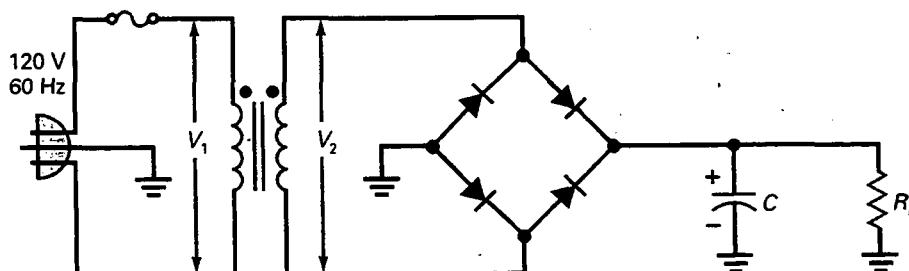


Figura 4-22. Detección de averías.

3. Si un diodo está abierto, la tensión continua en la carga será menor porque habrá sólo rectificación de media onda. También la frecuencia del rizado será de 50 Hz y no de 100 Hz. Si todos los diodos están abiertos no habrá salida.
4. Si la carga está en corto, el fusible se fundirá. Posiblemente uno o más diodos se estropearán o el transformador se dañará.
5. A veces, por envejecimiento, en el condensador del filtro aumenta la corriente de fugas, con lo que se reduce la tensión continua en la carga.
6. Ocasionalmente, algunas vueltas que hagan cortocircuito en el transformador reducen la tensión continua de salida. En este caso el transformador se siente muy caliente al tacto.
7. Además de estas averías también puede haber puentes de soldadura, uniones de soldadura en frío, malas conexiones, etc. La Tabla 4-3 resume estos fallos y sus síntomas.

EJEMPLO 4-11

Cuando el circuito de la Figura 4-23 funciona normalmente, tiene una tensión rms en el secundario de 12,7 V, una tensión en la carga de 18 V y una tensión de rizado pico a pico de 318 mV. Si el condensador del filtro está abierto, ¿qué le ocurre a la tensión continua en la carga?

SOLUCIÓN

Con el condensador del filtro abierto, el circuito se convierte en un puente rectificador normal sin condensador del filtro. Como no hay acción de filtrado, un osciloscopio a través de la carga representaría una señal de onda completa con un valor de pico de 18 V. El valor medio es el 63,6 por 100 de 18 V, que es 11,4 V.

EJEMPLO 4-12

Suponga que la resistencia de carga en la Figura 4-23 está en cortocircuito. Describa los síntomas.

Tabla 4-3. Fallos típicos para puentes rectificadores con filtro con condensador a la entrada

	V_1	V_2	$V_{L(dc)}$	V_R	f_{rizado}	Tipo de salida
Fusible fundido	0	0	0	0	0	Sin salida
Condensador abierto	OK	OK	Baja	Alta	100 Hz	Señal de onda completa
Un diodo abierto	OK	OK	Baja	Alta	50 Hz	Rizado de media onda
Todos los diodos abiertos	OK	OK	0	0	0	Sin salida
Carga en cortocircuito	0	0	0	0	0	Sin salida
Condensador con pérdidas	OK	OK	Baja	Alta	100 Hz	Salida pequeña
Arrollamientos en corto	OK	Baja	Baja	OK	100 Hz	Salida pequeña

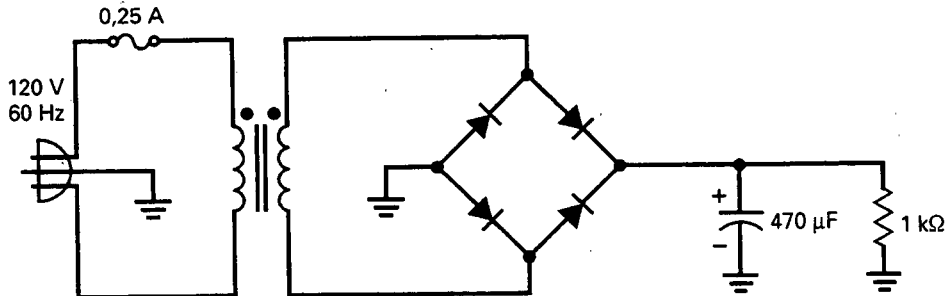


Figura 4-23

SOLUCIÓN

Un cortocircuito en la carga hará que la corriente alcance un valor extremadamente alto, lo que provocará que se funda el fusible. Además, es posible que uno o más diodos se destruyan antes de que el fusible se queme. Si está detectando averías en un circuito con una carga en cortocircuito, obtendrá una lectura de cero para todas las tensiones debido al fusible quemado. Después de probar el fusible con un óhmetro no se limite a sustituirlo y a encender el equipo.

Con la alimentación desconectada, sería conveniente verificar los diodos con un óhmetro para saber si alguno quedó destruido. Después de reemplazar cualquier diodo defectuoso, deberá medir la resistencia de carga con un óhmetro. Si indica cero, aún quedan fallos que detectar.

El fallo podría ser un puente de soldadura en la resistencia de carga, una mala conexión; en fin, hay muchas posibilidades. Los fusibles se queman a veces sin que se produzca un corto permanente en la carga.

En general, recuerde esto: *siempre que halle un fusible quemado, compruebe los posibles daños en los diodos y un posible corto en la resistencia de carga.*

Un detector de averías al final de este capítulo tiene nueve fallos diferentes, incluyendo diodos y condensadores abiertos, cargas en corto, fusibles quemados y masas en circuito abierto.

4-10. LIMITADORES DE NIVEL DE CONTINUA

Los diodos empleados en fuentes de alimentación de baja frecuencia son *diodos rectificadores*. Tienen una limitación de potencia mayor que 0,5 W y están optimizados para funcionar a 50 Hz. El diodo rectificador típico tiene una limitación de corriente de amperios. Excepto para fuentes de alimentación, los diodos rectificadores tienen poco uso porque la mayoría de los circuitos en los equipos electrónicos funcionan a frecuencias mucho más altas.

□ Diodos de pequeña señal

En esta sección estaremos usando *diodos para pequeña señal*. Estos diodos tienen limitaciones de potencia menores que 0,5 W (con corrientes de miliamperios y no de amperios) y se emplean en general a frecuencias mucho mayores que 50 Hz. Su construcción pequeña y ligera es lo que permite que funcionen a frecuencias muy superiores.

□ El limitador positivo

Un limitador es un circuito que elimina partes positivas o negativas de una forma de onda. Este tipo de procesamiento es útil en la conformación de señales, protección de circuitos y comunicaciones. La Figura 4-24a muestra un **limitador positivo** (llamado a veces *recortador*), que es un *circuito que elimina las partes positivas de la señal*. Como se ve, la tensión de salida tiene sólo semiciclos negativos.

El circuito funciona así: durante el semiciclo positivo de la señal de entrada el diodo conduce y aparece como un corto en los terminales de salida. Idealmente, la tensión debe ser cero. Durante el semiciclo negativo, el diodo tiene polarización inversa y está abierto. En este caso, el semiciclo negativo aparece a la salida. Por diseño, la resistencia en serie es mucho menor que la resistencia de carga. Ésta es la razón de que el pico negativo de salida se muestre como $-V_p$ en la Figura 4-24a.

En una segunda aproximación, la tensión del diodo es 0,7 V cuando conduce. Por tanto, el nivel de recorte no es cero, sino 0,7 V. Por ejemplo, si la señal de entrada tiene un valor de pico de 20 V, la salida del limitador aparecerá como en la Figura 4-24b.

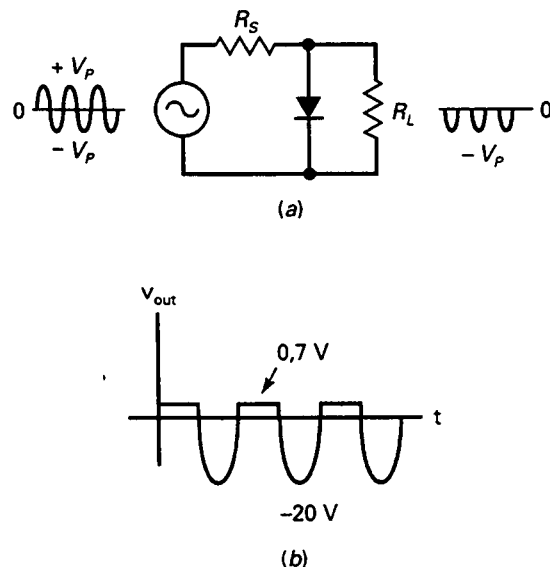


Figura 4-24. a) Limitador positivo; b) forma de onda de salida.

□ Definición de condiciones

Los diodos de pequeña señal tienen un área de unión más pequeña que los diodos rectificadores porque están optimizados para trabajar a frecuencias más altas. Como resultado, tienen una resistencia interna mayor. La hoja de características de un diodo de pequeña señal como el 1N914 muestra una corriente directa de 10 mA a 1 V. Por tanto, la resistencia interna es:

$$R_B = \frac{1 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 30 \Omega$$

¿Por qué es importante la resistencia interna? Porque el limitador no trabajará correctamente a menos que la resistencia en serie R_S sea mucho mayor que la resistencia interna. Además, el limitador no funcionará adecuadamente a menos que la resistencia en serie R_S sea mucho menor que la resistencia de carga. Para que un limitador funcione correctamente usaremos esta definición:

$$\text{Limitador duro : } 100R_B < R_S < 0,01R_L \quad (4-17)$$

Esto dice que la resistencia en serie debe ser 100 veces mayor que la resistencia interna y 100 veces menor que la resistencia de carga. Cuando un limitador satisface esas condiciones le llamamos un limitador duro. Por ejemplo, si el diodo tiene una resistencia interna de 30Ω , la resistencia en serie debería ser al menos $3 \text{ k}\Omega$ y la resistencia de carga debería ser al menos $300 \text{ k}\Omega$.

□ El limitador negativo

Si se invierte la polaridad del diodo en la Figura 4-25a, se obtiene un **limitador negativo**. Como podía esperar, esto *elimina las partes negativas de la señal*. Idealmente, la forma de onda de salida sólo tiene semiciclos positivos.

El recorte no es perfecto. A causa de la *tensión umbral* del diodo (otra forma de llamar a la barrera de potencial), el nivel de recorte está cercano a los $-0,7 \text{ V}$. Si la señal de entrada tiene un pico de 20 V , la señal de salida será como la de la Figura 4-25b.

□ Circuito fijador

El limitador es útil para conformación de señales, pero el mismo circuito se puede usar de una forma diferente. Eche un vistazo a la Figura 4-26a. La entrada normal a este circuito es una señal con un pico de sólo 15 mV . Por tanto, la salida normal es la misma señal porque ningún diodo actúa durante el ciclo.

¿Qué tiene de bueno el circuito si los diodos no conducen? Siempre que se tenga un circuito sensible, uno que no puede tener demasiada entrada, se puede usar un limitador positivo-negativo para proteger su entrada, como se muestra en la Figura 4-26b. Si la señal de entrada trata de superar los $0,7 \text{ V}$,

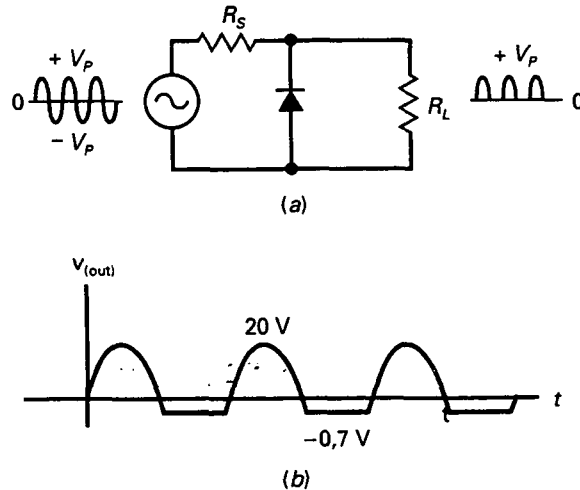


Figura 4-25. a) Limitador negativo; b) forma de onda de salida.

la salida se limita a 0.7 V . Por otro lado, si la señal de entrada trata de bajar de -0.7 V , la salida queda limitada a -0.7 V . En un circuito como éste, el funcionamiento normal significa que la señal de entrada siempre es menor que 0.7 V en ambas polaridades.

Un ejemplo de circuito sensible es el amplificador operacional, un circuito integrado que se expondrá en capítulos posteriores. La tensión de entrada típica a un amplificador operacional es menor que 15 mV .

Tensiones superiores a 15 mV no son normales, y las tensiones mayores que 0.7 voltios son anormales. Un limitador a la entrada de un amplificador operacional previene que sean aplicadas tensiones de entrada excesivas ac-

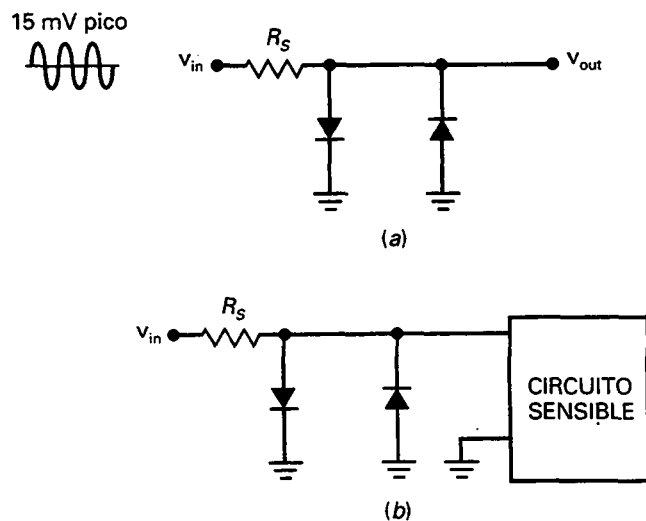


Figura 4-26. a) Circuito fijador; b) protegiendo un circuito sensible.

cidentalmente. Un ejemplo más familiar de un circuito sensible es un medidor de bobina móvil. Incluyendo un limitador, podemos proteger el movimiento del medidor contra tensiones o corrientes de entrada excesivas.

El limitador de la Figura 4-26a se denomina también *circuito fijador*. El término sugiere la fijación o limitación de la tensión en un rango especificado. Con un circuito fijador, los diodos permanecen apagados durante el funcionamiento normal. Los diodos conducen sólo cuando algo es anormal, cuando la señal es demasiado grande.

❑ Limitadores polarizados

El nivel de referencia (lo mismo que el nivel de recorte) de un limitador positivo es idealmente cero, o $0,7\text{ V}$ en una segunda aproximación. ¿Qué podemos hacer para cambiar este nivel de referencia?

En electrónica, **polarizar** significa *aplicar una tensión externa para cambiar el nivel de referencia de un circuito*. La Figura 4-27a es un ejemplo de polarización para cambiar el nivel de referencia de un limitador positivo. Añadiendo una fuente de tensión continua en serie con el diodo podemos cambiar el nivel del límite. La nueva V debe ser menor que V_p para funcionar con normalidad. Con un diodo ideal la conducción empieza tan pronto como la tensión de entrada sea mayor que V . En una segunda aproximación empieza cuando la tensión de entrada sea mayor que $V + 0,7\text{ V}$.

La Figura 4-27b muestra cómo polarizar un limitador negativo. Note que el diodo y la batería están invertidos. Debido a eso el nivel de referencia cambia a $-V - 0,7\text{ V}$. La forma de onda de salida se limita negativamente al nivel de polarización.

❑ Combinación de limitadores

Podemos combinar los dos limitadores polarizados como se muestra en la Figura 4-28. El diodo D_1 recorta las partes positivas por encima del nivel de polarización positivo, y el diodo D_2 recorta las partes por debajo del nivel de polarización negativa. Cuando la tensión de entrada es muy grande compa-

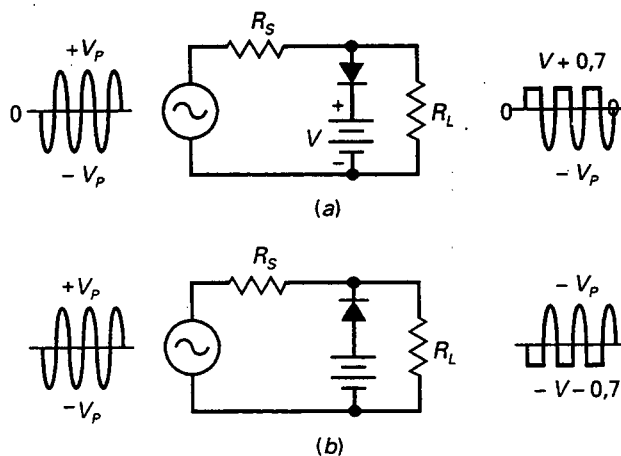
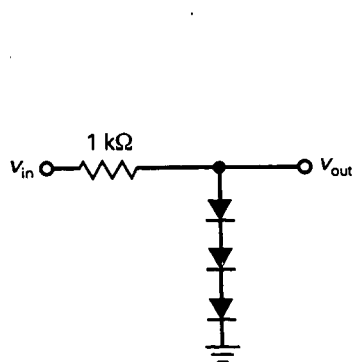
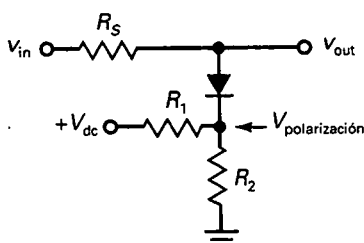


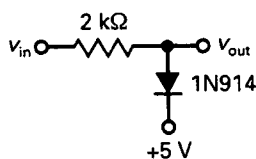
Figura 4-27. a) Limitador positivo polarizado; b) limitador negativo polarizado.



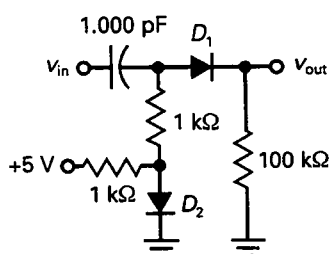
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4-29. a) Limitador con tres tensiones umbral; b) un divisor de tensión polariza el limitador; c) un circuito fijador protege por encima de 5,7 V; d) el diodo D_2 polariza a D_1 para eliminar la tensión umbral.

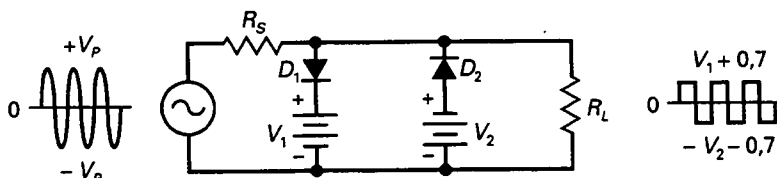


Figura 4-28. Limitador positivo-negativo polarizado.

rada con los niveles de polarización, la señal de salida es una onda cuadrada, como se muestra en la Figura 4-28. Este es otro ejemplo de conformación de señales que se puede hacer con limitadores.

□ Variaciones

Usar baterías para fijar el nivel de recorte es poco práctico. Una opción posible consiste en añadir más diodos de silicio, ya que cada uno de ellos produce una caída de tensión de 0,7 V.

Por ejemplo, la Figura 4-29a muestra tres diodos en un limitador positivo. Como cada diodo tiene una tensión aproximada de 0,7 V, el par de diodos produce un nivel de recorte aproximadamente de 2,1 V. La aplicación no tiene por qué ser de conformación de onda. Podemos usar el mismo circuito como un fijador para proteger un circuito sensible que no puede tolerar más de 2,1 V de entrada.

La Figura 4-29d muestra otra manera de polarizar un limitador sin baterías. Esta vez, usamos un divisor de tensión (R_1 y R_2) para ajustar el nivel de polarización. El nivel de polarización viene dado por:

$$V_{\text{polarización}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{dc}} \quad (4-18)$$

En este caso, la tensión de salida se recorta o limita cuando la entrada es mayor que $V_{\text{polarización}} + 0,7$ V.

La Figura 4-29c muestra un circuito fijador polarizado. Se puede usar para proteger circuitos sensibles de tensiones de entrada excesivas. El nivel de polarización se muestra como +5 V. Puede ser cualquier nivel que se desee. Con un circuito como éste, una tensión grande destructiva de +100 V nunca alcanza la carga porque el diodo limita la tensión de salida a un valor máximo de +5,7 V.

En otros casos se emplea una variación como la que se ve en la Figura 4-29d para eliminar la tensión del diodo limitador D_1 . La idea es la siguiente: el diodo D_2 tiene una ligera polarización directa para conducción, por lo que su tensión es aproximadamente de 0,7 V. Estos 0,7 V se aplican a 1 kΩ en serie con D_1 y 100 kΩ, lo que supone que el diodo D_1 está a punto de conducir. En consecuencia, cuando llega una señal, D_1 conduce cerca de los 0 V.

4-11. EL CAMBIADOR DE NIVEL DE CONTINUA

El cambiador de nivel de continua añade una tensión continua a la señal.

□ El cambiador de nivel positivo

La Figura 4-30a muestra la idea básica de un cambiador de nivel de continua. Cuando un cambiador positivo tiene una onda sinusoidal a la entrada, añade una tensión continua positiva a la onda sinusoidal. Dicho de otra forma, el cambiador de nivel de continua positivo desplaza el nivel de referencia de alterna (normalmente cero) hasta un nivel de continua. El efecto es una tensión alterna centrada en un nivel de continua. Esto significa que cada punto de la onda sinusoidal se ve desplazado hacia arriba, como se muestra en la onda de salida.

La Figura 4-30b muestra una forma equivalente de ver el efecto de un cambiador positivo. Una fuente alterna controla el lado de la entrada al cambiador de nivel de continua. La tensión de Thevenin de la salida del cambiador de nivel es la superposición de una fuente continua y una alterna. La señal alterna tiene una tensión continua de V_p añadida a ella. Ésta es la razón de que la onda sinusoidal entera de la Figura 4-30a se desplazará hacia arriba hasta alcanzar un pico positivo de $2V_p$ y un pico negativo de cero.

En la Figura 4-31a se representa un cambiador de nivel de continua positivo. Idealmente, funciona de la siguiente manera: en el primer semiciclo negativo de la tensión de entrada el diodo conduce como se muestra en la Figura 4-31b. En el pico negativo, el condensador debe cargarse a V_p con la polaridad indicada.

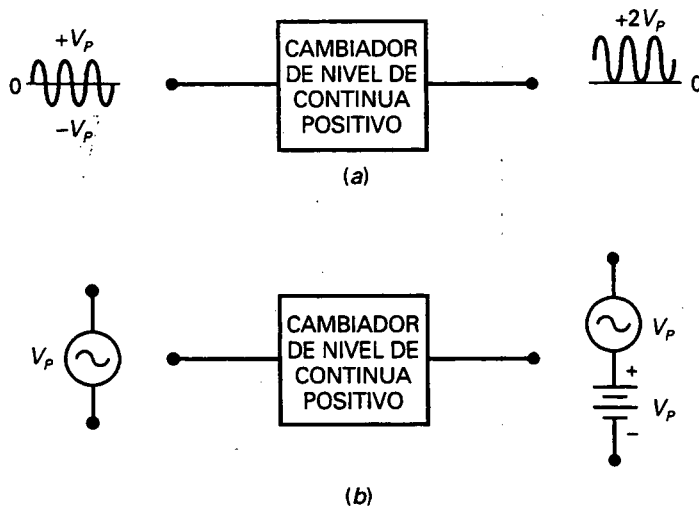


Figura 4-30. a) Cambiador de nivel de continua positivo desplaza la forma de onda hacia arriba; b) el cambiador de nivel de continua positivo añade una componente continua a la señal.

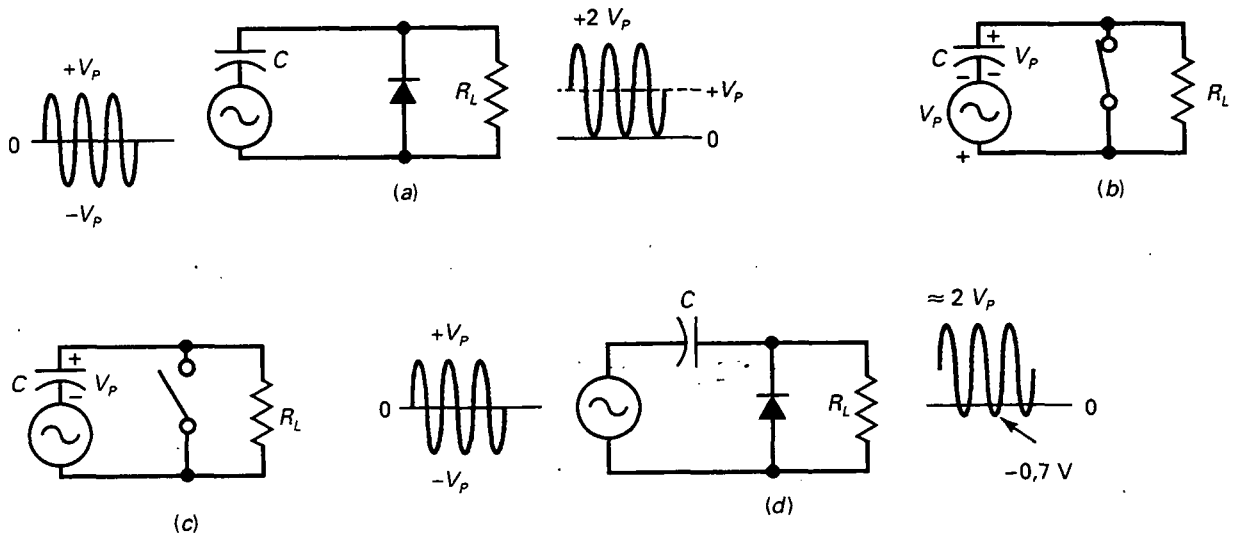


Figura 4-31. a) Cambiador de nivel de continua ideal; b) en el pico positivo; c) por encima del pico positivo; d) el cambiador de nivel de continua no es tan perfecto.

Un poco después del pico negativo el diodo se abre, como se ve en la Figura 4-31c. La constante de tiempo $R_L C$ es, deliberadamente, mucho mayor que el período T de la señal de entrada. Definiremos *mucho más grande* como al menos 100 veces más grande:

$$\text{Cambiador de nivel de continua duro: } R_L C > 100T \quad (4-19)$$

Por esta razón, el condensador permanece casi completamente cargado durante el tiempo en el que el diodo no conduce. En una primera aproximación, el condensador actúa como una pila de V_p voltios. Por ello, la tensión de salida en la Figura 4-31a es una señal desplazada positivamente V_p . Cualquier cambiador que satisfaga la Ecuación (4-19) se denomina *cambiador de nivel de continua duro*.

La idea es similar a como funciona un rectificador de media onda con un filtro con condensador a la entrada. En el primer cuarto de ciclo se carga el condensador totalmente. Después el condensador retiene casi toda su carga durante los ciclos siguientes. La pequeña carga que se pierde entre ciclos se reemplaza por la conducción del diodo.

En la Figura 4-31c, el condensador cargado parece una batería con una tensión de V_p . Ésta es la tensión continua que se está añadiendo a la señal. Después del primer cuarto de ciclo, la tensión de salida es una onda sinusoidal desplazada positivamente con un nivel de referencia de 0; es decir, se sitúa sobre un nivel de 0 V.

En la Figura 4-31d se ve el circuito como habitualmente se dibuja. Como el diodo absorbe 0,7 V al conducir, la tensión del condensador no puede alcanzar el valor V_p . Por esta razón, el cambio de nivel no es perfecto, y los picos negativos tienen un nivel de referencia de -0,7 V.

□ El cambiador de nivel negativo

¿Qué sucede si se da la vuelta al diodo de la Figura 4-31d? Obtenemos el cambiador de nivel de continua negativo de la Figura 4-32. Como puede observarse, la polaridad de la tensión del condensador se invierte y el circuito se convierte en un cambiador de nivel de continua negativo. De nuevo, el cambiador no es perfecto porque los picos positivos tienen un nivel de referencia de 0,7 V en lugar de 0 V.

Para recordar hacia dónde se mueve el nivel de continua de una señal, note que el diodo apunta en la dirección del desplazamiento. En la Figura 4-32, el diodo apunta hacia abajo, la misma dirección que el desplazamiento de la onda sinusoidal. Esto nos dice que es un cambiador de nivel de continua negativo. En la Figura 4-31a, el diodo apunta hacia arriba, la forma de onda se desplaza hacia arriba y tenemos un cambiador de nivel de continua positivo.

Ambos cambiadores de nivel, el positivo y el negativo, son frecuentemente utilizados. En los receptores de televisión, por ejemplo, se usa un cambiador de nivel de continua para añadir una tensión continua a la señal de vídeo. También se utilizan en circuitos de comunicaciones y radar.

Una aclaración final. La imperfección de los circuitos limitadores y cambiadores de nivel de continua comentada anteriormente no es un problema. Después de que se expongan los amplificadores operacionales volveremos sobre los limitadores y cambiadores de nivel de continua. En ese momento, se verá lo fácil que es eliminar el problema de la barrera de potencial. En otras palabras, estudiaremos circuitos que son casi perfectos.

□ El detector pico a pico

Un rectificador de media onda con filtro con condensador a la entrada produce una tensión continua de salida aproximadamente igual al pico de la señal de entrada. Cuando *el mismo circuito usa un diodo de pequeña señal*, se denomina un **detector de pico**. Típicamente, los detectores de pico operan a frecuencias que son muy superiores a 50 Hz. La salida de un detector de pico es útil para medidas, procesamiento de señal y comunicaciones.

Si se conectan en cascada un cambiador de nivel de continua y un detector de picos, se obtiene un **detector pico a pico** (Fig. 4-33). Como puede observar, la salida de un cambiador de nivel de continua se usa como entrada a un detector de pico. La onda sinusoidal de entrada sufre un cambio de nivel de continua positivo; por tanto, la entrada al detector de picos tiene un valor de pico de $2V_p$. Ésta es la razón por la que la salida del detector de picos presenta una tensión continua igual a $2V_p$.

Como siempre, la constante de tiempo de descarga $R_L C$ debe ser mucho mayor que el período de la señal de entrada. Al cumplir esta condición, se

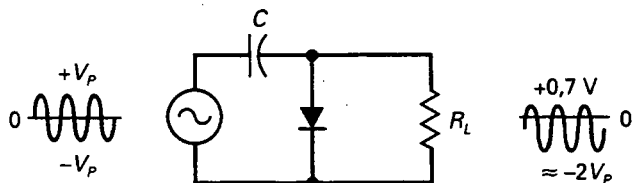


Figura 4-32. Cambiador de nivel de continua negativo.

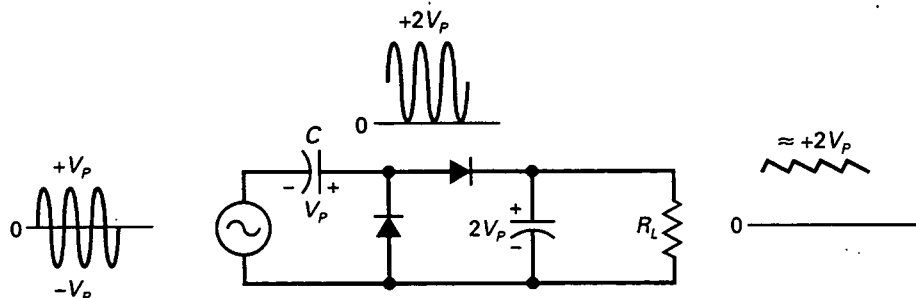


Figura 4-33. Detector pico a pico.

obtiene un buen cambio de nivel y una buena detección de picos. El rizado de salida será consecuentemente pequeño.

Una aplicación es la medida de señales no sinusoidales. Un voltímetro de alterna normal se calibra para leer los valores rms de una señal alterna. Si usted trata de medir una señal no sinusoidal, obtendrá una lectura incorrecta con un voltímetro de alterna normal. Sin embargo, si la salida de un detector pico a pico se usa como entrada a un voltímetro de continua, indicará la tensión pico a pico. Si la señal no sinusoidal varía entre -20 y $+50$ V, la lectura es 70 V.

4-12. MULTIPLICADORES DE TENSIÓN

Un detector pico a pico usa diodos de pequeña señal y opera a frecuencias altas. Usando diodos rectificadores y operando a 60 Hz podemos producir un nuevo tipo de fuente de alimentación denominado **duplicador de tensión**.

□ Duplicador de tensión

La Figura 4-34a es un duplicador de tensión. La configuración es la misma que un detector pico a pico, excepto que usamos diodos rectificadores y operan a 60 Hz. La sección del cambiador añade una componente continua a la tensión del secundario. El detector de pico produce entonces una tensión de continua a la salida que es dos veces la tensión del secundario.

¿Por qué molestarse en usar un duplicador de tensión cuando podemos cambiar la relación de espiras para obtener más tensión de salida? La respuesta es que no necesita usar un duplicador de tensión a tensiones bajas. La única vez que tendrá problemas es cuando trate de producir tensiones de salida muy altas.

Por ejemplo, la tensión de red es 120 V rms, o 170 V de pico. Si trata de producir 3.400 V de continua, necesitará usar un transformador de relación de espiras 1 : 20. Aquí es donde aparece el problema. Las tensiones en el secundario muy altas sólo se pueden obtener con transformadores grandes. En algún momento, un diseñador debe decidir que sería más simple usar un duplicador de tensión y un transformador más pequeño.

□ Triplicador de tensión

Conectando otra sección, se obtiene el **triplicador de tensión** de la Figura 4-34b. Las dos secciones actúan como un duplicador. En el pico del semiciclo negativo, D_3 tiene polarización directa. Esto carga C_3 a $2V_p$ con la polaridad que se ve en la Figura 4-34b. La salida del triplicador aparece entre C_1 y C_3 . La resistencia de carga se conecta a la salida del triplicador. Mientras la constante de tiempo sea elevada, la tensión de salida será aproximadamente igual a $3V$.

□ Cuadriplicador de tensión

El circuito de la Figura 4-34c es un **cuadriplicador de tensión** con cuatro secciones en cascada (una tras otra). Las tres primeras son un triplicador y la cuarta hace del circuito un cuadriplicador. El primer condensador se carga a V_p ; los demás se cargan a $2V_p$. La salida del cuadriplicador aparece en la conexión en serie de C_2 y C_4 . Como de costumbre, se requiere una resistencia de carga elevada (constante de tiempo grande) para tener una salida aproximada de $4V_p$.

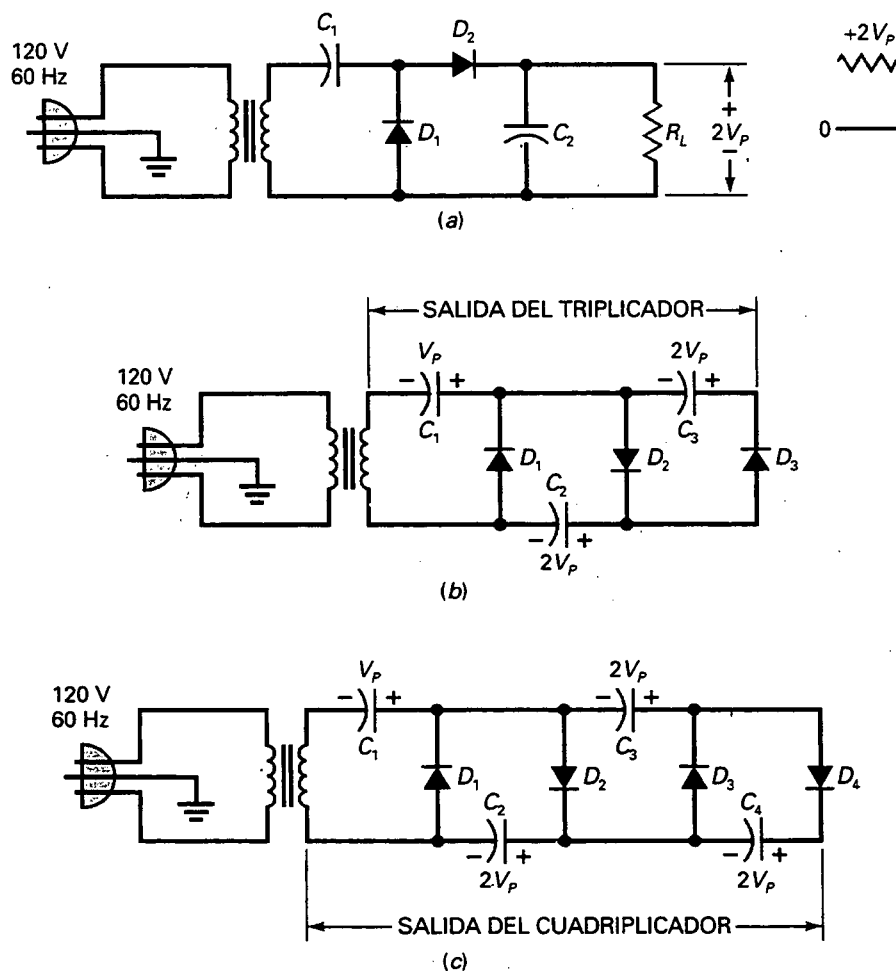


Figura 4-34. Multiplicadores de tensión con cargas flotantes. a) Doblador; b) triplicador; c) cuadriplicador.

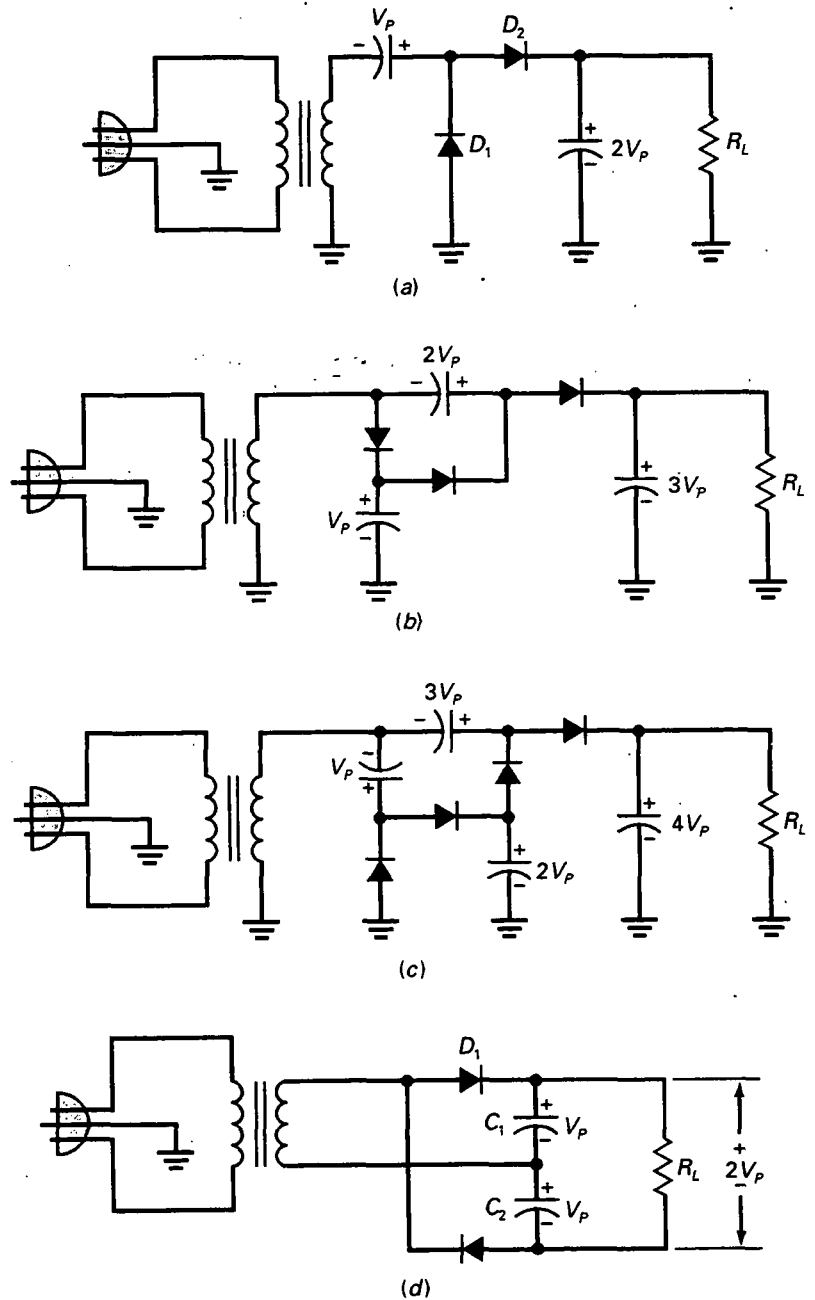


Figura 4-35. Multiplicadores de tensión con cargas a tierra, excepto el duplicador de onda completa. a) Duplicador; b) triplicador; c) cuádruplicador; d) duplicador de onda completa.

Teóricamente, podemos añadir secciones indefinidamente, pero el rizado empeora mucho con cada nueva sección. El incremento del rizado es otra razón por la que los multiplicadores de tensión (duplicadores, triplicadores y cuádruplicadores) no se usan en fuentes de alimentación de poca tensión.

Como establecimos antes, los multiplicadores de tensión se usan casi siempre para producir tensiones altas, del orden de cientos o miles de voltios. Los multiplicadores de tensión son la selección natural para dispositivos de alta tensión y corrientes pequeñas como los tubos de rayos catódicos (CRT) usados en los receptores de televisión, osciloscopios y monitores de ordenador.

❑ Variaciones

Todos los multiplicadores de tensión mostrados en la Figura 4-34 usan resistencias de carga que son flotantes. Esto significa que ninguno de los extremos de la carga está a tierra. Las Figuras 4-35a, b y c muestra variaciones de los multiplicadores de tensión. La Figura 4-35a meramente añade masas a la Figura 4-34a. Por otro lado, las Figuras 4-35b y c son rediseños del triplicador (Fig. 4-34b) y cuádruplicador (Fig. 4-34c). En algunas aplicaciones se pueden ver diseños con cargas flotantes (tal como en los CRT); en otros se pueden ver diseños con cargas a tierra.

❑ Duplicador de tensión de onda completa

En la Figura 4-35d se representa un duplicador de tensión de onda completa. Durante el semiciclo positivo de la fuente, el condensador superior se carga a la tensión de pico con la polaridad mostrada. Durante el semiciclo siguiente, el condensador inferior se carga a la tensión de pico con la polaridad indicada. Con una carga pequeña, la tensión de salida final es aproximadamente igual a $2V_p$.

Los multiplicadores de tensión expuestos anteriormente son diseños de media onda; es decir, la frecuencia de rizado de salida es de 60 Hz. Por otro lado, el circuito de la Figura 4-35d recibe el nombre de **duplicador de onda completa** porque cada uno de los condensadores de salida se carga durante cada semiciclo. Debido a esto, el rizado de salida es de 120 Hz. Esta frecuencia de rizado es una ventaja al ser más fácil de filtrar. Otra ventaja del duplicador de onda completa es que la limitación máxima de tensión inversa (PIV) de los diodos sólo requiere ser mayor que V_p .

RESUMEN

Sección 4-1. El rectificador de media onda

El rectificador de media onda tiene un diodo en serie con una resistencia de carga. La tensión en la carga es una salida de media onda. La tensión media o continua de un rectificador de media onda es igual al 31,8 por 100 de la tensión de pico.

Sección 4-2. El transformador

El transformador de entrada es normalmente un transformador reductor en el que la tensión se reduce y la corriente se incrementa. La tensión en el secundario es

igual a la tensión en el primario dividida por la relación de espiras.

Sección 4-3. El rectificador de onda completa

El rectificador de onda completa tiene un transformador con conexión intermedia, con dos diodos y una resistencia de carga. La tensión en la carga es una onda sinusoidal rectificada completa con un valor de pico de igual a la mitad de la tensión de pico del secundario. La tensión media o continua a la salida del rectificador de onda completa es igual al 63,6 por 100 de la tensión de pico, y la frecuencia del rizado es igual a 120 Hz en lugar de 60 Hz.

144 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

Sección 4-4. El puente rectificador

El puente rectificador tiene cuatro diodos. La tensión en la carga es una onda sinusoidal rectificada completa con un valor de pico igual a la tensión de pico del secundario. La tensión media o continua en la carga es igual al 63,6 por 100 de la tensión de pico, y la frecuencia de rizado es de 120 Hz.

Sección 4-5. El filtro de choque

El filtro de choque a la entrada es un divisor de tensión LC en el que la reactancia inductiva es mucho mayor que la reactancia capacitiva. El tipo de filtro permite que el valor medio de la señal rectificada pasa a la resistencia de carga.

Sección 4-6. El filtro con condensador a la entrada

Este tipo de filtro permite que el valor de pico de la señal rectificada pase a la resistencia de carga. Con un condensador grande el rizado es pequeño, típicamente menor que el 10 por 100 de la tensión de continua. El filtro con condensador a la entrada es el más usado en fuentes de alimentación.

Sección 4-7. Tensión inversa de pico y corriente inicial

La tensión inversa de pico es la tensión máxima que aparece a través del diodo que no conduce en un circuito rectificador. Esta tensión debe ser menor que la tensión de ruptura del diodo. La corriente inicial es la corriente breve pero grande que existe cuando se alimenta el circuito por primera vez. Es breve y grande porque el condensador del filtro se debe cargar a la tensión de pico durante el primer ciclo o, al menos, durante los primeros ciclos.

Sección 4-8. Más sobre fuentes de alimentación

Los transformadores reales normalmente especifican la tensión del secundario para una determinada corriente por la carga. Para calcular la corriente en el primario se puede suponer que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida. Para proteger el circuito de la corriente inicial, se usan normalmente fusibles de fundido lento. La corriente media en un rectificador de media onda es igual a la corriente continua en la carga. En un rectificador de onda completa o puente rectificador, la corriente media en cualquier diodo es la mitad de la corriente continua en la carga. Ocasionalmente se pueden usar filtros RC y LC para filtrar la salida rectificada.

Sección 4-9. Detección de averías

Algunas de las medidas que se pueden hacer con un filtro con condensador a la entrada son la tensión continua de salida, la tensión en el primario, la tensión en el secundario y el rizado. A partir de ellas se puede, normalmente, deducir el problema. Los diodos abiertos reducen la tensión de salida a cero. Un condensador de filtro abierto reduce la salida al valor medio de la señal rectificada.

Sección 4-10. Limitadores

Un limitador conforma la señal. Recorta las partes positivas o negativas de la señal. El circuito fijador protege circuitos sensibles de entradas excesivas.

Sección 4-11. Cambiadores de nivel de continua

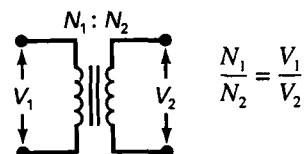
El cambiador de nivel de continua desplaza una señal positiva o negativamente añadiendo una tensión continua a la señal. El detector pico a pico produce una tensión en la carga igual al valor de pico a pico.

Sección 4-12. Multiplicadores de tensión

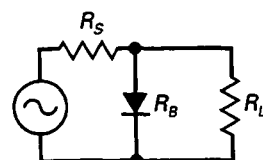
El duplicador de tensión es un rediseño del detector pico a pico. Usa diodos rectificadores en lugar de diodos de pequeña señal. Produce una salida igual a dos veces el valor de pico de la señal rectificada. Los triplicadores y cuadruplicadores de tensión multiplican el pico de entrada por un factor de 3 y 4. El principal uso de los multiplicadores de tensión son las fuentes de alimentación de alta tensión.

DEFINICIONES

(4-14) Relación de espiras:

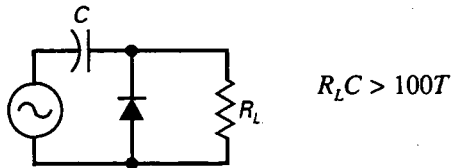


(4-17) Limitador duro:

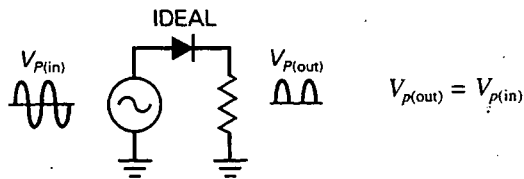


$$100R_B < R_S < 0,01R_L$$

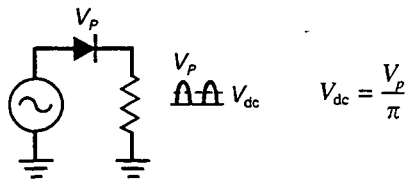
(4-19) Cambiador de nivel de continua duro:

**DERIVACIONES**

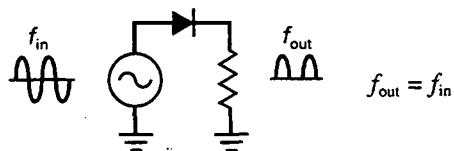
(4-1) Media onda ideal:



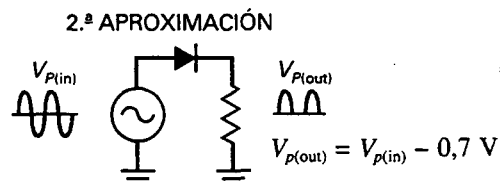
(4-2) Media onda:



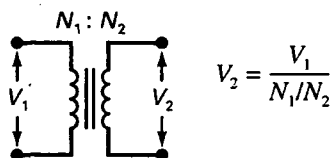
(4-3) Media onda:



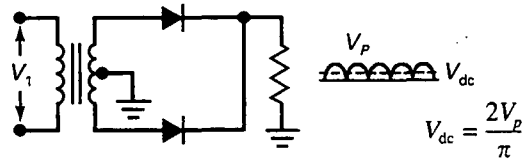
(4-4) 2.ª media onda:



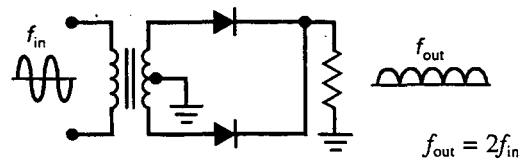
(4-5) Transformador ideal:



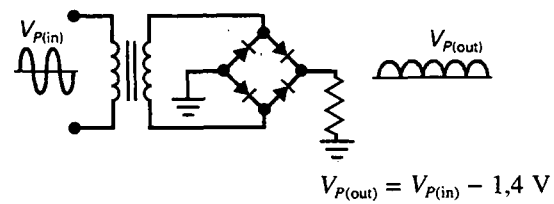
(4-6) Onda completa:



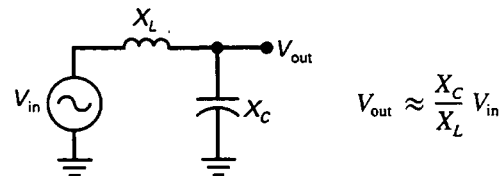
(4-7) Onda completa:



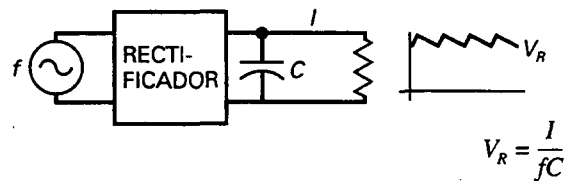
(4-8) 2.º puente:



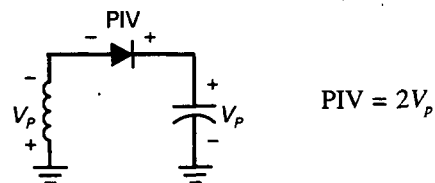
(4-9) Filtro de choque de entrada:



(4-10) Rizado pico a pico:

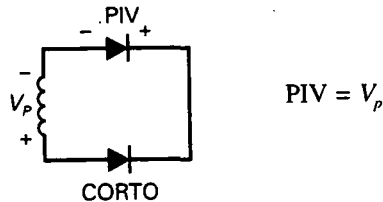


(4-11) Media onda:

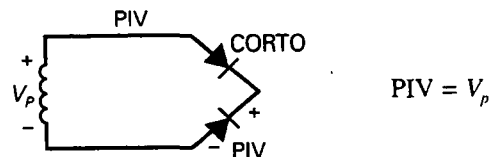


146 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

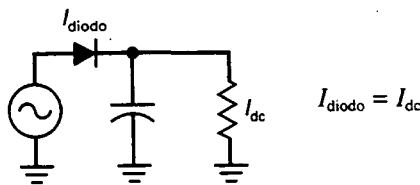
(4-12) Onda completa:



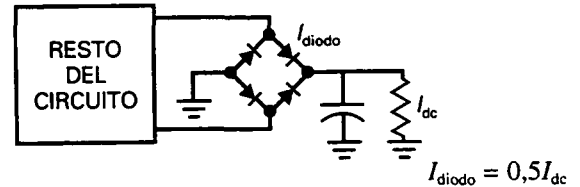
(4-13) Puente:



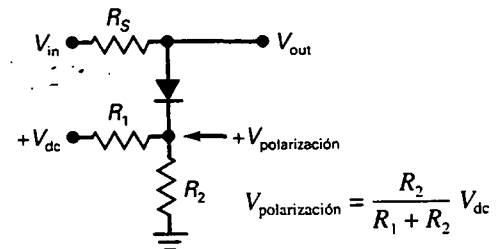
(4-15) Media onda:



(4-16) Onda completa y puente:



(4-18) Limitador polarizado:



CUESTIONES

- Si $N_1/N_2 = 2$ y la tensión en el primario es de 120 V, ¿cuál es el valor de la tensión en el secundario?
 - 0 V
 - 36 V
 - 40 V
 - 60 V
- En un transformador reductor, ¿qué magnitud es mayor?
 - Tensión en el primario
 - Tensión en el secundario
 - Ninguno de los dos
 - No hay respuesta posible
- Un transformador tiene una relación de espiras de 4:1. ¿Cuál es la tensión de pico en el secundario si se aplican 115 V rms al arrollamiento primario?
 - 40,7 V
 - 64,6 V
 - 163 V
 - 650 V
- Con una tensión rectificada en media onda en la resistencia de carga, ¿durante qué parte de un ciclo circula corriente por la carga?
 - 0°
 - 90°
 - 180°
 - 360°
- Suponga que en un rectificador de media onda la tensión de red puede fluctuar entre 105 y 125 V rms. Con un transformador reductor 5:1, la tensión de pico en la carga es aproximadamente de
 - 21 V
 - 25 V
 - 29,6 V
 - 35,4 V
- La tensión que se obtiene de un puente rectificador es
 - Una señal de media onda
 - Una señal de onda completa
 - Una señal de puente rectificador
 - Una onda sinusoidal
- Si la tensión de red es de 115 V rms, una relación de espiras de 5:1 significa que la tensión en el secundario es aproximadamente
 - 15 V
 - 23 V
 - 30 V
 - 35 V
- ¿Cuál es la tensión de pico en la carga en un rectificador de onda completa si la tensión del secundario es de 20 V rms?
 - 0 V
 - 0,7 V
 - 14,1 V
 - 28,3 V
- Se desea que un puente rectificador proporcione una tensión de pico en la carga de 40 V. ¿Cuál es

el valor rms aproximado de la tensión en el secundario?

- a) 0 V c) 28,3 V
b) 14,4 V d) 56,6 V
10. Si a una resistencia de carga se le aplica una tensión rectificada de onda completa, ¿durante qué parte de un ciclo circula corriente por la carga?
a) 0° c) 180°
b) 90° d) 360°
11. ¿Qué tensión de pico en la carga se obtiene de un puente rectificador si la tensión en el secundario es de 15 V rms? (Emplee la segunda aproximación.)
a) 9,2 V c) 19,8 V
b) 15 V d) 24,3 V
12. Si la frecuencia de red es de 50 Hz, la frecuencia de salida de un rectificador de media onda es
a) 25 Hz c) 100 Hz
b) 50 Hz d) 200 Hz
13. Si la frecuencia de red es de 50 Hz, la frecuencia de salida de un puente rectificador es
a) 25 Hz c) 100 Hz
b) 50 Hz d) 200 Hz
14. Con la misma tensión en el secundario y el mismo filtro, ¿cuál de los siguientes elementos produce más rizado?
a) Un rectificador de media onda
b) Un rectificador de onda completa
c) Un puente rectificador
d) Imposible saberlo
15. Con la misma tensión del secundario y el mismo filtro, ¿cuál de los siguientes factores produce la menor tensión en la carga?
a) Un rectificador de media onda
b) Un rectificador de onda completa
c) Un puente rectificador
d) Imposible saberlo
16. Si la corriente por la carga, filtrada, es de 10 mA, ¿cuál de los siguientes rectificadores tiene una corriente de diodo de 10 mA?
a) Un rectificador de media onda
b) Un rectificador de onda completa
c) Un puente rectificador
d) Imposible saberlo
17. ¿Cuál es la tensión pico a pico del rizado que se obtiene de un puente rectificador, si la corriente por la carga es de 5 mA y la capacidad del filtro vale 1.000 μ F?
a) 21,3 pV c) 21,3 mV
b) 56,3 nV d) 41,7 mV
18. Cada uno de los diodos de un puente rectificador tiene una limitación de máxima corriente continua igual a 2 A. Esto significa que la corriente continua por la carga puede tener un valor máximo de
a) 1 A c) 4 A
b) 2 A d) 8 A

19. ¿Cuál es el VIP en cada uno de los diodos de un puente rectificador si la tensión en el secundario es de 20 V rms?
a) 14,1 V c) 28,3 V
b) 20 V d) 34 V
20. Si en un puente rectificador con filtro con condensador a la entrada la tensión en el secundario aumenta, entonces la tensión en la carga
a) Disminuye
b) Se mantiene constante
c) Aumenta
d) Ninguna de las anteriores
21. Si la capacidad del filtro aumenta, entonces el rizado
a) Disminuye
b) Se mantiene constante
c) Aumenta
d) Ninguna de las anteriores

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

- Aquí tiene lápiz y papel. Dígame cómo funciona un puente rectificador con filtro con condensador a la entrada. En su explicación incluya un diagrama del circuito y formas de onda en diferentes puntos del circuito.
- Suponga que tengo un puente rectificador con un filtro con condensador a la entrada en mi banco de laboratorio. No está funcionando. Dígame cómo podría detectar la avería. Indique el tipo de instrumentos que usaría y cómo aislaría las averías comunes.
- Una corriente o tensión excesiva puede destruir los diodos en una fuente de alimentación. Dibuje un puente rectificador con filtro con condensador a la entrada y dígame cómo puede destruir un diodo la tensión o la corriente. Haga lo mismo para tensiones inversas excesivas.
- Dígame todo lo que sabe sobre limitadores, fijadores y diodos fijadores. Muéstreme formas de onda típicas, niveles de recorte, niveles de fijación de continua y niveles de protección.
- Quiero que me diga cómo funciona un detector pico a pico. Después, quiero que me diga en qué sentido es similar un duplicador de tensión a un detector pico a pico y en qué es diferente.
- ¿Cuál es la ventaja de usar un puente rectificador en una fuente de alimentación en lugar de un rectificador de onda completa o de media onda? ¿Por qué es más eficiente el puente rectificador que los otros?
- ¿En qué aplicación con fuente de alimentación preferiría usar un filtro tipo LC en lugar de un tipo RC? ¿Por qué?

148 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

8. ¿Cuál es la relación entre un rectificador de media onda y un rectificador de onda completa?
9. ¿Bajo qué circunstancias es apropiado usar un multiplicador de tensión como parte de una fuente de alimentación?
10. Suponga que una fuente de alimentación continua tiene una salida de 5 V. Usted mide exactamente 5 V a la salida de esta fuente usando un voltímetro de continua. ¿Es todavía posible que la fuente de alimentación tenga un problema? Si es así, ¿cómo lo detectaría?
11. ¿Por qué usaría un multiplicador de tensión en lugar de un transformador con una relación de espiras superior y un rectificador ordinario?
12. Enumere las ventajas y desventajas del filtro RC y el filtro LC.
13. Detectando averías en una fuente de alimentación usted encuentra una resistencia quemada. Una medida muestra que la resistencia está en circuito abierto. ¿Debería usted reemplazar la resistencia y encender de nuevo el circuito? Si no es así, ¿qué haría después?
14. Para un puente rectificador enumere tres fallos posibles y qué síntomas tendrían.

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 4-1. El rectificador de media onda

- 4-1. ¿Cuál es la tensión de pico de salida en la Figura 4-36a si el diodo es ideal? ¿Y el valor medio? ¿Y el valor de continua? Dibuje la forma de onda de salida.
- 4-2. Repita el problema precedente para la Figura 4-36b.

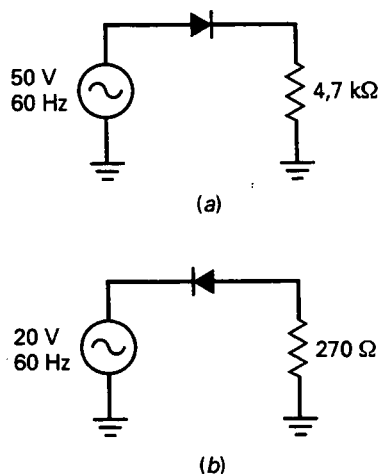


Figura 4-36

- 4-3. ¿Cuál es la tensión de pico de salida en la Figura 4-36a usando la segunda aproximación del diodo? ¿Y el valor medio? ¿Y el valor de continua? Dibuje la forma de onda de salida.
- 4-4. Repita el problema precedente para la Figura 4-36b.

Sección 4-2. El transformador

- 4-5. Si un transformador tiene una relación de espiras de 15 : 1, ¿cuál es la tensión rms del secundario? ¿y la tensión de pico del secundario? Suponga una tensión en el primario de 120 V rms.
- 4-6. Si un transformador tiene una relación de espiras de 1 : 12, ¿cuál es la tensión rms del secundario? ¿Y la tensión de pico del secundario? Suponga una tensión en el primario de 120 V rms.
- 4-7. Calcule la tensión de pico de salida y la tensión continua de salida en la Figura 4-37 usando un diodo ideal.

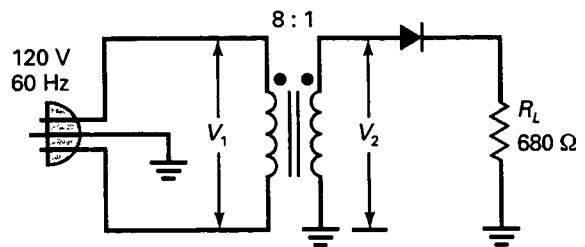


Figura 4-37

- 4-8. Calcule la tensión de pico de salida y la tensión continua de salida en la Figura 4-37 usando la segunda aproximación.

Sección 4-3. El rectificador de onda completa

- 4-9. Un transformador con conexión central tiene una relación de espiras de 6 : 1. ¿Cuál es la tensión rms a través de la mitad superior del arrollamiento secundario? ¿Y la tensión de pico? ¿Cuál es la tensión rms a través de la mitad inferior del arrollamiento secundario?
- 4-10. ¿Cuál es la tensión de pico de salida en la Figura 4-38 si los diodos son ideales? ¿Y el valor medio? ¿Y el valor de continua? Dibuje la forma de onda de salida.
- 4-11. Repita el problema precedente usando la segunda aproximación.

Sección 4-4. El puente rectificador

- 4-12. En la Figura 4-39, ¿cuál es la tensión de pico de salida si los diodos son ideales? ¿Y el valor

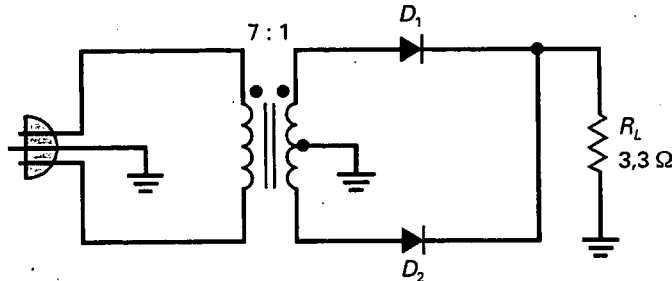


Figura 4-38

medio? ¿Y el valor de continua? Dibuje la forma de onda de salida.

4-13. Repita el problema precedente usando la segunda aproximación.

4-14. Si la tensión de red varía en la Figura 4-39 de 105 a 125 V-rms, ¿cuál es la tensión mínima de salida? ¿Y la máxima?

Sección 4-5. El filtro de choque

4-15. Una señal de media onda con un pico de 20 V es la entrada a un filtro de choque. Si $X_L = 5 \text{ k}\Omega$ y $X_C = 25 \Omega$, ¿cuál es el rizado pico a pico aproximado en el condensador?

4-16. Una señal de onda completa con un pico de 14 V es la entrada a un filtro de choque. Si $X_L = 1 \text{ k}\Omega$ y $X_C = 50 \Omega$, ¿cuál es el rizado pico a pico aproximado en el condensador?

Sección 4-6. Filtro con condensador a la entrada

4-17. ¿Cuáles son la tensión continua de salida y el rizado en la Figura 4-40a? Dibuje la forma de onda de salida.

4-18. En la Figura 4-40b calcule la tensión continua de salida y el rizado.

4-19. ¿Qué le pasa al rizado de la Figura 4-40a si se duplica la capacidad?

4-20. En la Figura 4-40b, ¿qué le pasa al rizado si se duplica la resistencia?

4-21. ¿Cuáles son la tensión continua de salida y el rizado en la Figura 4-41? Dibuje la forma de onda de salida.

4-22. Si la tensión de red baja hasta 105 V en la Figura 4-41, ¿cuál es la tensión continua de salida?

Sección 4-7. Tensión inversa de pico y corriente inicial

4-23. ¿Cuál es la tensión inversa de pico en la Figura 4-41?

4-24. Si la relación de espiras cambia a 5:1 en la Figura 4-41, ¿cuál es la tensión inversa de pico?

Sección 4-8. Más sobre fuentes de alimentación

4-25. Un F-25X reemplaza al transformador de la Figura 4-41. ¿Cuál es la tensión de pico aproximada a través del arrollamiento secundario?, ¿y la tensión continua de salida aproximada?, ¿está operando el transformador con su corriente máxima de salida?, ¿será la tensión continua de salida mayor o menor que la normal?

4-26. ¿Cuál es la corriente del primario en la Figura 4-41?

4-27. ¿Cuál es la corriente media a través de cada diodo de la Figura 4-41?

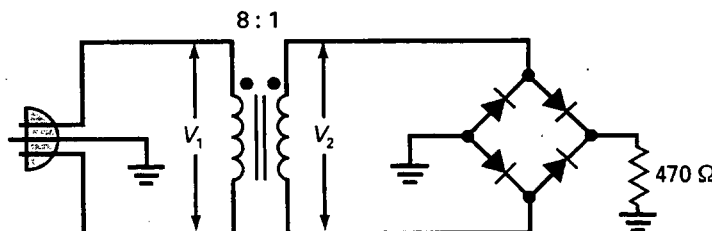


Figura 4-39

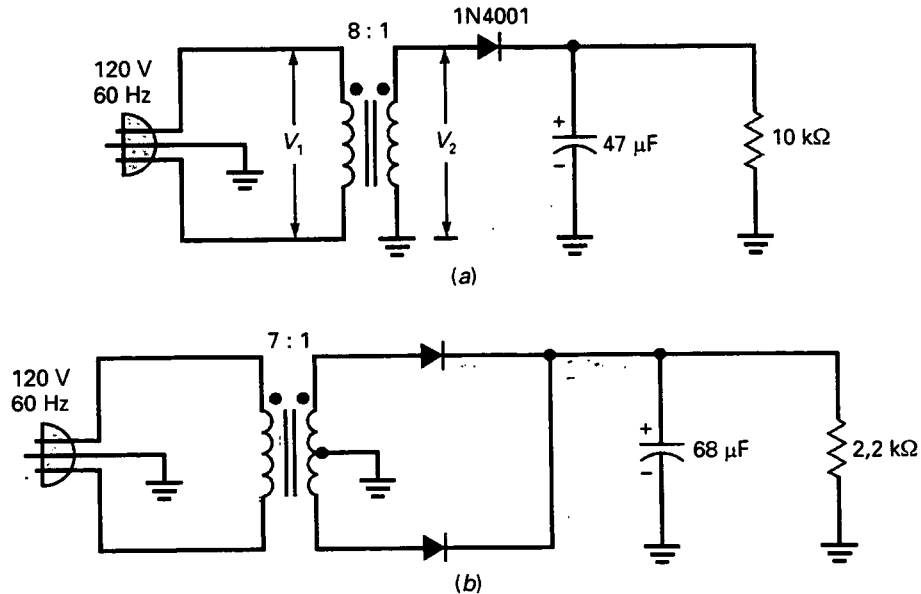


Figura 4-40

Sección 4-9. Detección de averías

- 4-28. Si el condensador del filtro de la Figura 4-41 está abierto, ¿cuál es la tensión continua de salida?
- 4-29. Si sólo un diodo de la Figura 4-41 está abierto, ¿cuál es la tensión continua de salida?
- 4-30. Si alguien construye el circuito de la Figura 4-41 con el condensador electrolítico al revés, ¿qué tipo de problema podría suceder?

- 4-33. El diodo fijador de la Figura 4-42c protege el circuito sensible. ¿Cuáles son los niveles límite?
- 4-34. En la Figura 4-42d, ¿cuál es la tensión positiva máxima de salida y la tensión negativa máxima de salida? Dibuje la forma de onda de salida.
- 4-35. Si la onda sinusoidal de la Figura 4-42d es sólo 20 mV el circuito funcionará como un diodo fijador en lugar de un limitador polarizado. En este caso, ¿cuál es el rango de tensiones de salida protegido?

Sección 4-10. Limitadores

- 4-31. En la Figura 4-42a dibuje la forma de onda de salida. ¿Cuál es la tensión positiva máxima y la tensión negativa máxima?
- 4-32. Repita el problema precedente para la Figura 4-42b.

Sección 4-11. Fijadores de continua

- 4-36. En la Figura 4-43a dibuje la forma de onda de salida. ¿Cuál es la tensión positiva máxima y la tensión negativa máxima?

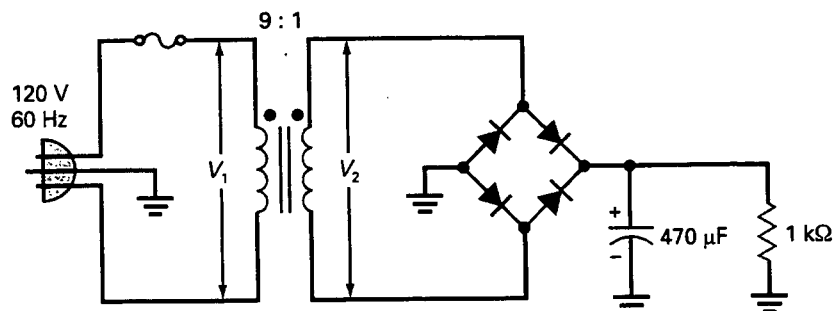


Figura 4-41

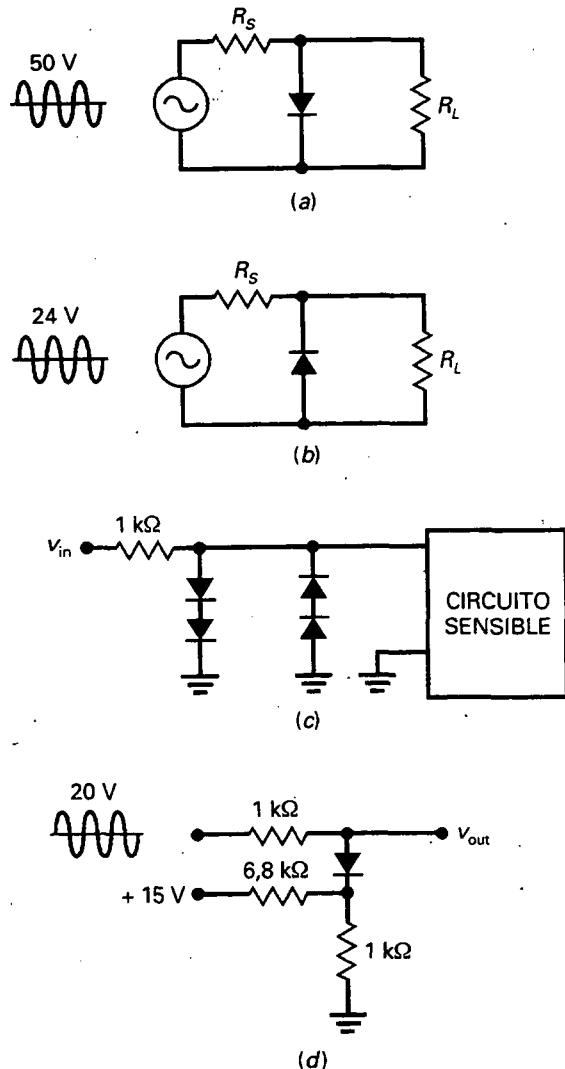


Figura 4-42

- 4-37. Repita el problema precedente para la Figura 4-43b.
 4-38. Dibuje la forma de onda de salida del fijador y salida final en la Figura 4-43c. ¿Cuál es la tensión continua de salida con diodos ideales?, ¿y con la segunda aproximación?

Sección 4-12. Multiplicadores de tensión

- 4-39. Calcule la tensión continua de salida en la Figura 4-44a.
 4-40. ¿Cuál es la salida triplicada en la Figura 4-44b?
 4-41. ¿Cuál es la salida cuádruplicada en la Figura 4-44c?

CIRCUITOS CON DIODOS 151

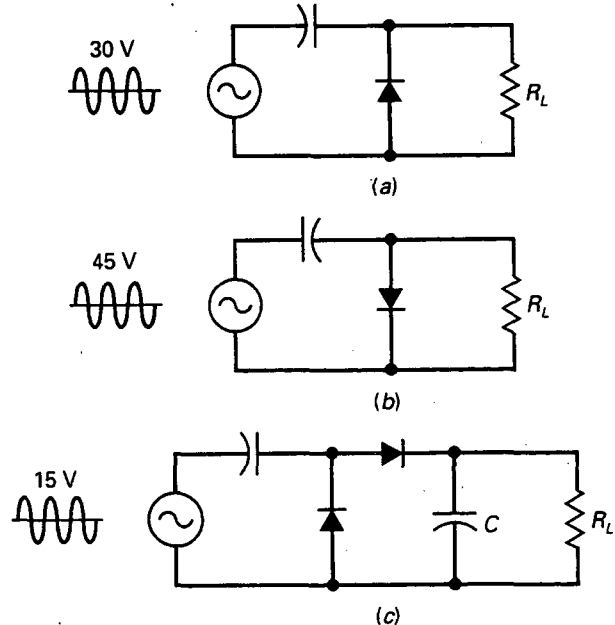


Figura 4-43

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 4-42. La fuente de alimentación de la Figura 4-45 tiene dos tensiones de salida. ¿Cuáles son sus valores aproximados?
 4-43. Una resistencia inicial de $4,7 \Omega$ se añade a la Figura 4-45. ¿Cuál es el valor máximo posible para la corriente inicial?
 4-44. Una tensión de onda completa tiene un valor de pico de 15 V. Alguien le proporciona un libro de tablas trigonométricas de tal forma que puede consultar el valor de una onda sinusoidal a intervalos de 1° . Describa cómo podría probar que el valor medio de una onda completa es 63,6 por 100 del valor de pico.
 4-45. Para la posición del conmutador mostrado en la Figura 4-46, ¿cuál es la tensión de salida? Si el conmutador cambia de posición, ¿cuál es la tensión de salida?
 4-46. Si V_{in} es 40 V rms en la Figura 4-47, y la constante de tiempo RC es muy grande comparada con el período de la fuente de alimentación, ¿a qué es igual V_{out} ? ¿Por qué?

DETECTOR DE AVERÍAS

- 4-47. La Figura 4-48 muestra un Detector de averías. Encuentre las 9 averías T1 a T9. *Nota:* Si no sabe cómo usar un Detector de averías revise el Ejemplo 1-10. Explica cómo decodificar cada medida.

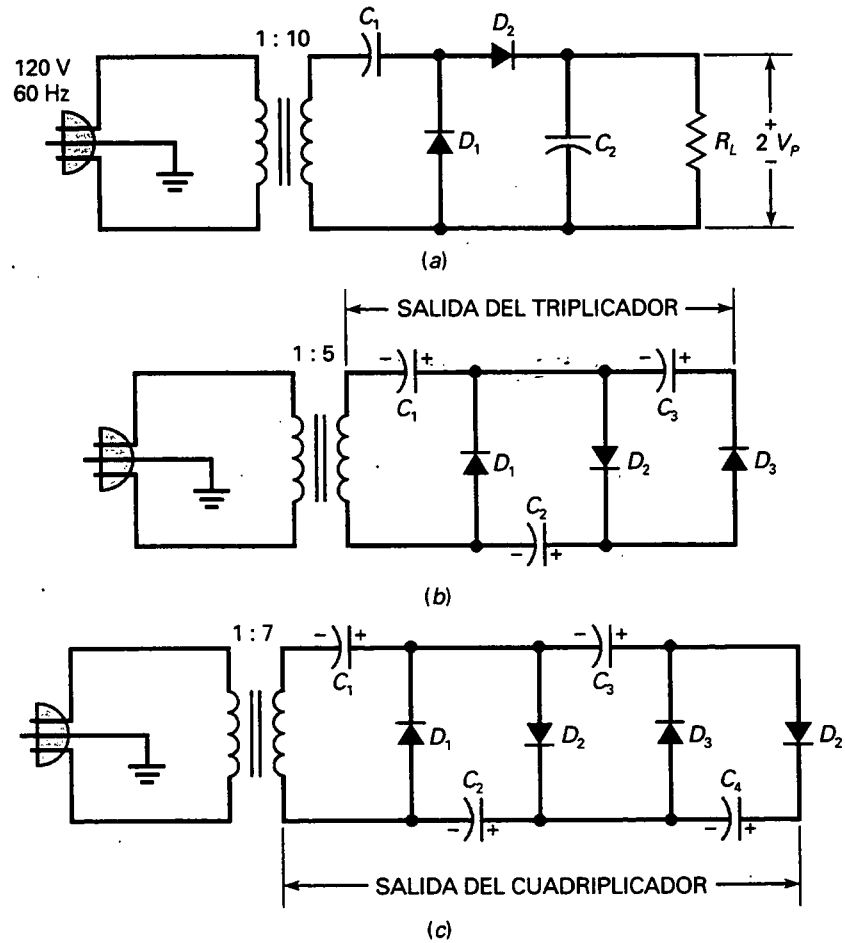


Figura 4-44

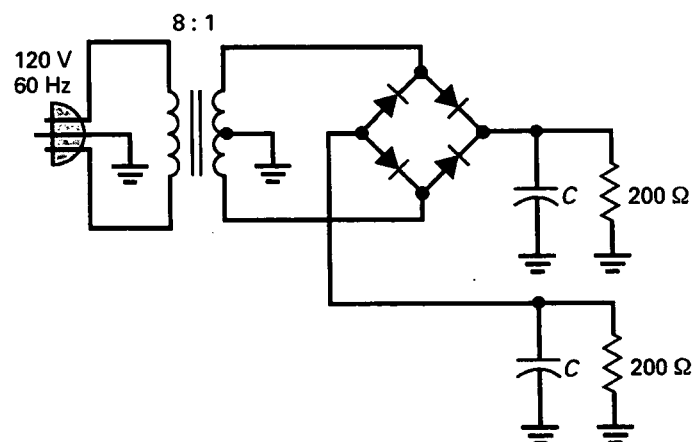


Figura 4-45

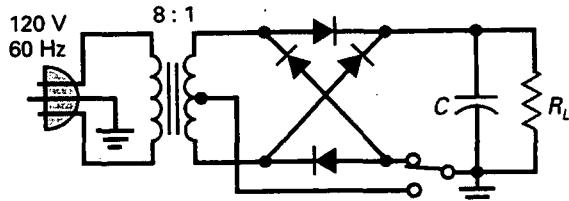


Figura 4-46

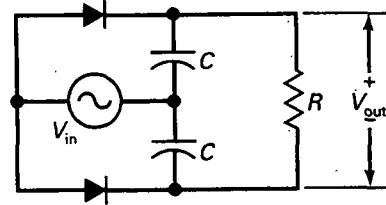
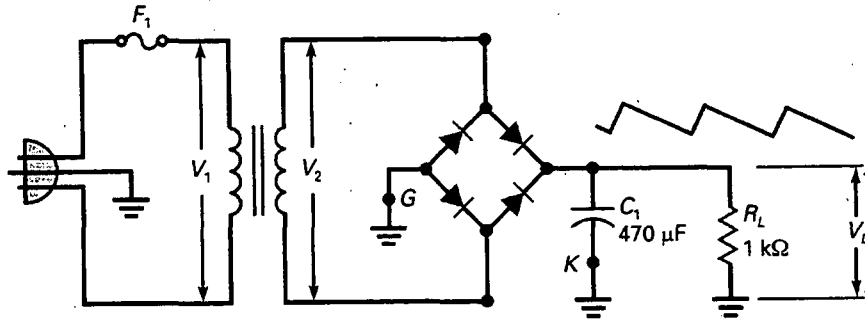


Figura 4-47



OK	T1	T2	T3	T4
V_1 : D2	V_1 : F3	V_1 : A1	V_1 : C1	V_1 : D4
V_2 : B6	V_2 : B2	V_2 : C4	V_2 : A4	V_2 : E2
V_L : F5	V_L : D7	V_L : F2	V_L : A7	V_L : G5
V_R : G1	V_R : E1	V_R : D6	V_R : B5	V_R : A6
f : A3	f : C6	f : G4	f : C3	f : G2
R_L : C5	R_L : E4	R_L : A5	R_L : D1	R_L : F1
C_1 : F7	C_1 : G3	C_1 : D3	C_1 : C7	C_1 : E3
F_1 : B4	F_1 : B7	F_1 : E6	F_1 : E5	F_1 : D5
T5	T6	T7	T8	T9
V_1 : F4	V_1 : A1	V_1 : D1	V_1 : A4	V_1 : D4
V_2 : E7	V_2 : E2	V_2 : C1	V_2 : C1	V_2 : B6
V_L : A2	V_L : F5	V_L : A6	V_L : F4	V_L : D7
V_R : F6	V_R : A7	V_R : E7	V_R : A7	V_R : E1
f : G7	f : F6	f : G2	f : G5	f : C6
R_L : C2	R_L : B3	R_L : C5	R_L : E4	R_L : C2
C_1 : B1	C_1 : D5	C_1 : F7	C_1 : B5	C_1 : B7
F_1 : B3	F_1 : B4	F_1 : B4	F_1 : B3	F_1 : D3

	1	2	3	4	5	6	7
A	115	0	120	0	1 k	0	7
B	OK	12.7	∞	OK	0	12.7	OK
C	0	1 k	0	12.7	1 k	120	OK
D	0	115	OK	115	OK	0.6	11.4
E	18	12.7	OK	1 k	∞	OK	0
F	1 k	17.7	115	0	18	0	OK
G	0.3	0	∞	60	0	120	0

MEDIDAS

Figura 4-48. Detector de averías.

Diodos de propósito específico

OBJETIVOS

Después de estudiar este capítulo, debería ser capaz de:

- Mostrar cómo se usa el diodo zener y calcular algunos valores relacionados con su funcionamiento.
- Enumerar algunos dispositivos optoelectrónicos y describir su comportamiento.
- Describir dos ventajas de los diodos Schottky en comparación con los demás diodos.
- Explicar el funcionamiento de un varicap.
- Establecer la aplicación fundamental de un varistor.
- Enumerar cuatro parámetros de interés en la hoja de características de un diodo zener.

VOCABULARIO

- | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------|
| • coeficiente de temperatura | • diodo túnel | • optoacoplador |
| • diodo de corriente constante | • diodo zener | • optoelectrónica |
| • diodo de recuperación en escalón | • display de ánodo común | • prerregulador |
| • diodo emisor de luz (LED) | • display de cátodo común | • regulador zener |
| • diodo en oposición | • display de siete segmentos | • resistencia negativa |
| • diodo láser | • efecto zener | • resistencia zener |
| • diodo Schottky | • factor de ajuste | • varicap |
| | • fotodiodo | • varistor |
| | | • zona de fugas |

Los diodos más utilizados son los rectificadores. Se emplean en fuentes de alimentación para convertir tensión alterna en tensión continua. Pero la rectificación no es la única función que puede hacer un diodo. En este capítulo se discutirán otras aplicaciones de los diodos. Se comienza por el diodo zener, cuyas propiedades más útiles son las de la zona de ruptura. Los diodos zener son muy importantes, ya que son la clave para la regulación de tensión. Se verán también los diodos optoelectrónicos, los diodos Schottky, los varicap y otros.

5-1. EL DIODO ZENER

Los diodos rectificadores y los diodos para pequeña señal nunca se emplean intencionadamente en la zona de ruptura, ya que esto podría dañarlos. Un *diodo zener* es diferente; se trata de un diodo de silicio que se ha diseñado para que funcione en la zona de ruptura. Llamado a veces *diodo de avalancha*, el diodo zener es la parte esencial de los reguladores de tensión; éstos son circuitos que mantienen la tensión casi constante con independencia de que se presenten grandes variaciones de la tensión de red y de la resistencia de carga.

□ Gráfica corriente-tensión (I - V)

La Figura 5-1a muestra el símbolo de un diodo zener; la Figura 5-1b es otra opción. En cualquiera de los dos símbolos, las líneas recuerdan la letra «z», símbolo de zener. Variando el nivel de dopaje de los diodos de silicio, el fabricante puede producir diodos zener con tensiones de ruptura que van desde 2 hasta 200 V. Estos diodos pueden funcionar en cualquiera de las tres zonas: directa, de fugas y de ruptura.

La Figura 5-1c muestra la gráfica I - V de un diodo zener. En la zona directa comienza a conducir aproximadamente a los 0,7 V, igual que un diodo normal de silicio. En la zona de fugas (entre cero y la zona zener) circula solamente una pequeña corriente inversa. En un diodo zener la ruptura tiene un codo muy pronunciado, seguido de un aumento casi vertical en la corriente. Obsérvese que la tensión es casi constante, aproximadamente igual a V_Z en la mayor parte de la zona de ruptura. En las hojas de características es frecuente que se indique el valor de V_Z para un valor particular de la corriente I_{ZT} .

La Figura 5-1c también muestra la máxima corriente inversa I_{ZM} . Mientras la corriente inversa sea menor que I_{ZM} , el diodo está funcionando dentro de su zona de seguridad. Si la corriente es mayor que I_{ZM} , el diodo se destruirá. Para prevenir un exceso de corriente inversa se debe usar una resistencia limitadora de corriente (que se comentará más tarde).

□ Resistencia zener

En la tercera aproximación de un diodo de silicio, la tensión directa a través de un diodo es igual a la tensión umbral más una tensión adicional a través de la resistencia interna.

Similarmente, en la región de ruptura, la tensión inversa a través de un diodo es igual a la tensión de ruptura más una tensión adicional a través de la resistencia interna. En la zona inversa la resistencia interna se conoce como la **resistencia zener**. Esta resistencia es igual a la pendiente en la región de ruptura. En otras palabras, cuanto más vertical es la zona de ruptura menor es la resistencia zener.

En la Figura 5-1c, la resistencia zener significa que un aumento en la corriente inversa producirá un ligero aumento en la tensión inversa. El in-

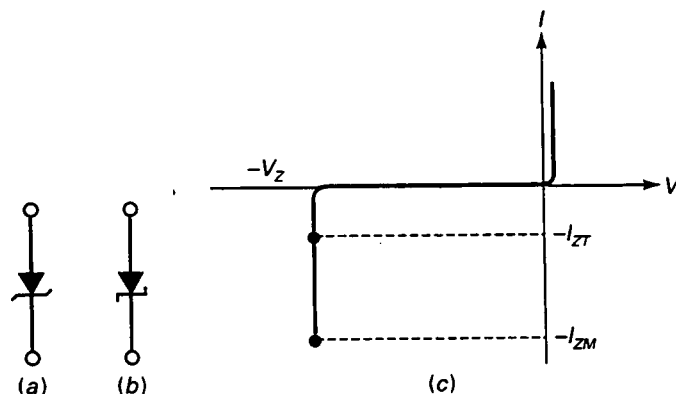


Figura 5-1. Diodo zener. a) Símbolo; b) símbolo alternativo; c) curva del diodo.

cremento de tensión es muy pequeño, generalmente de unas décimas de voltio. Esto puede ser muy importante en el diseño, pero no en la detección de averías ni en los análisis preliminares. A menos que se indique otra cosa, en nuestro estudio se hará caso omiso de la resistencia zener.

□ Regulador zener

Un diodo zener recibe a veces el nombre de diodo **regulador de tensión** porque mantiene la tensión entre sus terminales constante, incluso cuando la corriente sufra cambios. En condiciones normales, el diodo zener debe tener polarización inversa, como se ve en la Figura 5-2a. Además, para trabajar en la zona zener, la tensión de la fuente V_s debe ser mayor que la tensión de ruptura V_z . Siempre se emplea una resistencia en serie R_s , para limitar la corriente a un valor menor de su limitación máxima de corriente. En caso contrario, el diodo zener se quemaría, como cualquier dispositivo que disipase excesiva potencia.

En la Figura 5-2b se observa una forma alternativa de dibujar el circuito que incluye las masas. Siempre que un circuito tenga una línea de masa, es preferible medir las tensiones de los nudos respecto a masa.

Supóngase, por ejemplo, que se desea medir la tensión de la resistencia en serie de la Figura 5-2b. He aquí la forma de realizarlo cuando el circuito ya está construido. Primero, se mide la tensión desde el extremo izquierdo de R_s a masa. Segundo, se mide la tensión desde el extremo derecho de R_s a masa. Por último, se restan las dos tensiones para obtener la tensión en R_s . Si se tiene un voltímetro flotante, se puede conectar directamente entre los extremos de la resistencia en serie.

En la Figura 5-2c se ve la salida de una fuente de alimentación conectada a una resistencia en serie con un diodo zener. Este circuito se utiliza cuando se desea una tensión continua de salida que sea menor que la salida de la fuente de alimentación. Un circuito como éste recibe el nombre de **regulador zener de tensión** o simplemente **regulador zener**.

□ De nuevo, la ley de Ohm

En la Figura 5-2, la tensión en la resistencia en serie o resistencia limitadora de corriente es igual a la diferencia entre la tensión de la fuente y la tensión zener. Por tanto, la corriente en la resistencia es:

$$I_s = \frac{V_s - V_z}{R_s} \quad (5-1)$$

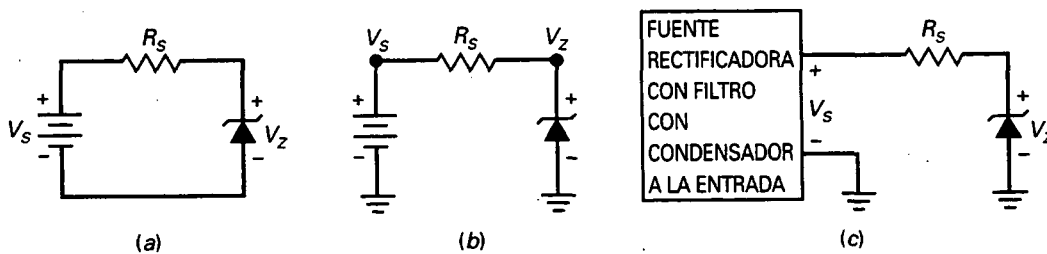


Figura 5-2. Regulador zener. a) Circuito básico; b) el mismo circuito con masas; c) la fuente de alimentación excita al regulador.

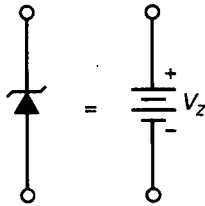


Figura 5-3. Aproximación ideal para un diodo zener.

Si ya se tiene el valor de la corriente en serie, se tiene también el valor de la corriente zener. Esto es porque la Figura 5-2 es un circuito en serie. Nótese que I_S tiene que ser menor que I_{ZM} .

□ Diodo zener ideal

Para detección de averías y análisis preliminares, la zona zener se puede aproximar mediante una recta vertical. En consecuencia, la tensión es constante incluso cuando la corriente cambie, lo cual equivale a ignorar la resistencia zener. En la Figura 5-3 se ilustra la aproximación ideal para un diodo zener. Esto significa que el diodo zener, al funcionar en la zona de ruptura, se comporta teóricamente como una batería. En un circuito, este hecho quiere decir que un diodo zener se puede sustituir mentalmente por una fuente de tensión de valor V_Z , suponiendo que el diodo zener esté funcionando en la zona de ruptura.

EJEMPLO 1-1

Suponga que el diodo zener de la Figura 5-4a tiene una tensión de ruptura de 10 V. ¿Cuáles son las corrientes zener máxima y mínima?

SOLUCIÓN

La tensión aplicada puede variar de 20 a 40 V. Idealmente, un diodo zener actúa como la batería que se ve en la Figura 5-4b. Por tanto, la tensión de salida es de 10 V para cualquier tensión en la fuente que esté en el margen de 20 a 40 V.

La corriente mínima se produce cuando la tensión de la fuente es mínima. Considere 20 V en el extremo izquierdo de la resistencia y 10 V en el extremo derecho. Entonces podrá ver que la tensión en la resistencia es $20 \text{ V} - 10 \text{ V} = 10 \text{ V}$. Lo que queda es la ley de Ohm:

$$I_S = \frac{10 \text{ V}}{820 \Omega} = 12,2 \text{ mA}$$

La corriente máxima se da cuando la tensión en la fuente es de 40 V. En ese caso, la tensión en la resistencia es de 30 V, lo que produce una corriente de

$$I_S = \frac{30 \text{ V}}{820 \Omega} = 36,6 \text{ mA}$$

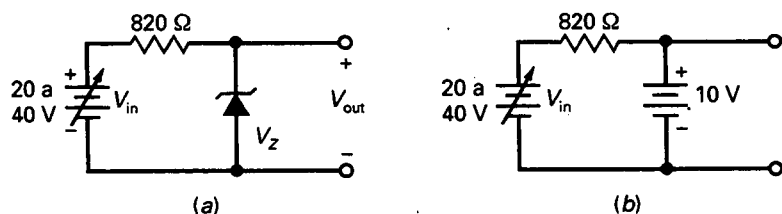


Figura 5-4. Ejemplo.

En un regulador de tensión como el de la Figura 5-4a, la tensión de salida se mantiene constante a 10 V, independientemente del cambio de 20 a 40 V en la tensión de la fuente. Una tensión de fuente mayor produce más corriente zener, pero la tensión de salida se mantiene firmemente en 10 V. (Si se incluye la resistencia zener, la tensión de salida aumenta ligeramente cuando la tensión de la fuente aumenta.)

5-2. EL REGULADOR ZENER CON CARGA

En la Figura 5-5a se muestra un regulador zener con carga, mientras que en la Figura 5-5b se muestra el mismo circuito con masas. El diodo zener funciona en la zona de ruptura y mantiene constante la tensión en la carga. Incluso cuando la tensión en la fuente cambia o la resistencia de carga varía, la tensión en la carga sigue estando fija e igual a la tensión zener.

□ Funcionamiento en la zona de ruptura

¿Cómo se puede saber si el diodo zener de la Figura 5-5 está trabajando en la zona de ruptura? A causa del divisor de tensión, la tensión Thevenin que ve el diodo es:

$$V_{TH} = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S \quad (5-2)$$

Ésta es la tensión que hay cuando el diodo zener está desconectado del circuito. Esta tensión de Thevenin tiene que ser mayor que la tensión zener; en caso contrario, el diodo no llegaría a polarizarse en la zona de ruptura.

□ Corriente en serie

A menos que se indique otra cosa, en todo el estudio siguiente diremos que el diodo zener está funcionando en la zona de ruptura. En la Figura 5-5, la corriente que circula por la resistencia en serie está dada por

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} \quad (5-3)$$

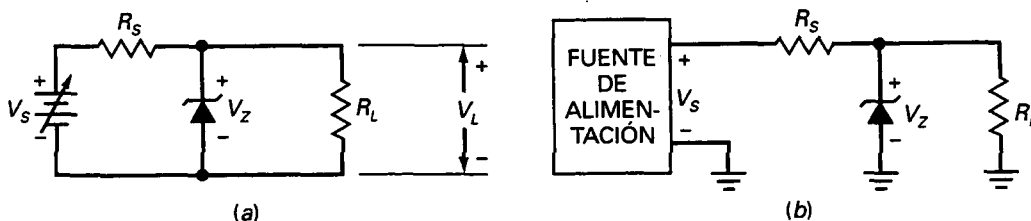


Figura 5-5. Regulador zener con carga. a) Circuito básico; b) circuito práctico.

Ésta es la ley de Ohm aplicada a la resistencia limitadora de corriente. Es la misma haya o no una resistencia de carga. En otras palabras, si se desconecta la resistencia de carga, la corriente en R_S seguirá siendo igual a la tensión en la resistencia dividida por la resistencia.

□ Corriente por la carga

Idealmente, la tensión en la carga es igual a la tensión zener, ya que la resistencia de carga está en paralelo con el diodo zener. Matemáticamente:

$$V_L = V_Z \quad (5-4)$$

Esto permite aplicar la ley de Ohm para calcular la corriente por la carga:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \quad (5-5)$$

□ Corriente zener

Por la ley de Kirchhoff de las corrientes,

$$I_S = I_Z + I_L$$

El diodo zener y la resistencia de carga están en paralelo. La suma de sus corrientes tiene que ser igual a la corriente total, que es la misma corriente que circula por la resistencia en serie.

Expresando esta relación de otra manera se obtiene esta importante ecuación:

$$I_Z = I_S - I_L \quad (5-6)$$

Esta ecuación indica que la corriente zener ya no es igual a la corriente en serie, como sucede en el regulador zener sin carga. Debido a la resistencia de carga, la corriente zener en este caso es igual a la corriente en serie menos la corriente por la carga.

La Tabla 5-1 resume los pasos en el análisis de un regulador zener con carga. Se empieza con la corriente en serie, se sigue por la tensión en la carga y la corriente por la carga, y finalmente la corriente zener.

Tabla 5-1. Analizando un regulador zener con carga

Proceso	Comentario
Paso 1 Calcular la corriente en serie, Ec. (5-3)	Aplicar la ley de Ohm a R_S
Paso 2 Calcular la tensión en la carga, Ec. (5-4)	La tensión en la carga iguala a la del diodo
Paso 3 Calcular la corriente por la carga, Ec. (5-5)	Aplicar la ley de Ohm a R_L
Paso 4 Calcular la corriente zener, Ec. (5-6)	Aplicar la ley de la corriente al diodo

□ Efecto zener

Cuando la tensión de ruptura es mayor de 6 V, la causa de la ruptura es el efecto avalancha, discutido en el capítulo 2. La idea básica es que los portadores minoritarios se aceleran a velocidades suficientemente altas como para desligar otros portadores minoritarios, produciendo una cadena o efecto avalancha que desencadena una gran corriente inversa.

El efecto zener es diferente. Cuando un diodo está fuertemente dopado, la zona de deplexión se hace muy estrecha. A causa de esto, el campo eléctrico a través de la zona de deplexión (tensión dividida por distancia) es muy intenso. Cuando la fuerza del campo alcanza aproximadamente 300.000 V/cm, el campo es lo suficientemente intenso para empujar a los electrones fuera de sus orbitales de valencia. La *creación de electrones libres de esta forma* se conoce como **efecto zener** (también denominado como emisión por campo grande). Esto es bastante diferente al efecto avalancha, que depende de portadores minoritarios de gran velocidad desligando a los electrones de valencia.

Cuando la tensión de ruptura es inferior a 4 V, sólo tiene lugar el efecto zener. Cuando la tensión de ruptura es superior a 6 V sólo ocurre el efecto avalancha. Cuando la tensión de ruptura está entre 4 y 6 V existen ambos efectos.

El efecto zener fue descubierto antes que el efecto avalancha, así que todos los diodos usados en la zona de ruptura se conocen como diodos zener. Aunque se puede oír ocasionalmente el término diodo de avalancha, el nombre diodo zener es el más general para todos los diodos de ruptura.

□ Coeficiente de temperatura

Al elevarse la temperatura ambiente circundante, la tensión zener cambia un poco. En las hojas de características el efecto de la temperatura se indica como **coeficiente de temperatura**, que es *el cambio en la tensión de ruptura por cada grado que aumenta la temperatura*. Para diodos zener con tensiones de ruptura menores de 4 V (efecto zener), el coeficiente de temperatura es negativo. Por ejemplo, un diodo zener con una tensión de ruptura de 3,9 V puede tener un coeficiente de temperatura de $-1,4 \text{ mV/}^\circ\text{C}$. Si la temperatura aumenta 1°C , la tensión de ruptura decrece 1,4 mV. Por otro lado, para diodos zener con tensiones de ruptura mayores de 6 V (efecto avalancha), el coeficiente de temperatura es positivo. Por ejemplo, un diodo zener con una tensión de ruptura de 6,2 V puede tener un coeficiente de temperatura de $2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$. Si la temperatura aumenta 1°C , la tensión de ruptura aumenta 2 mV.

Entre 4 y 6 V, el coeficiente de temperatura cambia de negativo a positivo, lo que significa que es posible hallar un punto de funcionamiento para el diodo zener en el cual *el coeficiente de temperatura sea cero*. Este dato es importante en algunas aplicaciones en que se requiere una tensión zener constante en un intervalo grande de temperaturas.

EJEMPLO 5-2

¿Está el diodo zener de la Figura 5-6a funcionando en la zona de ruptura?

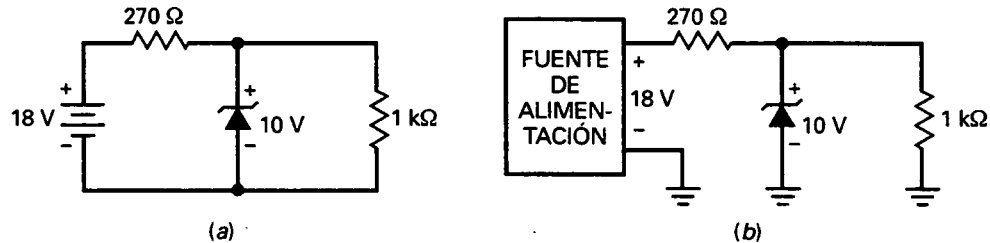


Figura 5-6. Ejemplo.

SOLUCIÓN

Con la Ecuación (5-2):

$$V_{TH} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{270 \Omega + 1 \text{ k}\Omega} (18 \text{ V}) = 14.2 \text{ V}$$

Como esta tensión Thevenin es mayor que la tensión zener, el diodo zener funciona en la zona de ruptura.

EJEMPLO 5-3

¿Cuál es el valor de la corriente zener en la Figura 5-6b?

SOLUCIÓN

Ya conoce la tensión en ambos extremos de la resistencia en serie. Reste las tensiones y podrá ver que hay 8 V en la resistencia en serie. Entonces la ley de Ohm da:

$$I_s = \frac{8 \text{ V}}{270 \Omega} = 29.6 \text{ mA}$$

Como la tensión en la carga es de 10 V, la corriente por la carga es:

$$I_L = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

La corriente zener es la diferencia de las dos corrientes:

$$I_Z = 29.6 \text{ mA} - 10 \text{ mA} = 19.6 \text{ mA}$$

EJEMPLO 5-4

¿Qué función realiza el circuito de la Figura 5-7?

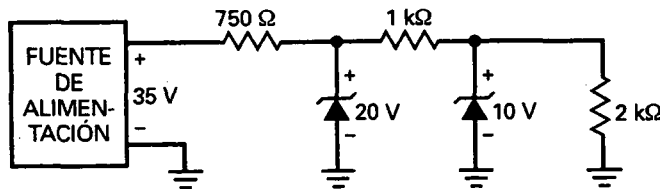


Figura 5-7. Ejemplo.

SOLUCIÓN

Este es un ejemplo de un preregulador (el primer diodo zener) que excita a un regulador zener (el segundo diodo zener). En primer lugar, observe que el preregulador tiene una tensión de salida de 20 V. Esta es la entrada para el segundo regulador zener, cuya salida es de 10 V. El propósito es suministrar al segundo regulador una entrada bien regulada, para que la salida final esté perfectamente ajustada.

EJEMPLO 5-5

¿Qué es lo que hace el circuito de la Figura 5-8?

SOLUCIÓN

En la mayor parte de las aplicaciones, los diodos zener se usan en reguladores de tensión donde se mantienen en la zona zener. Pero hay excepciones. A veces, dichos diodos se emplean en circuitos para conformación de ondas, como el de la Figura 5-8.

Observese la conexión de dos diodos zener opuestos (enfrentados). Durante el semiciclo positivo, el diodo de arriba conduce y el de abajo está en la zona zener, por tanto, la salida queda recortada como se muestra. El nivel de recorte es igual a la tensión zener (diodo en ruptura) más 0,7 V (diodo con polarización directa). Durante el semiciclo negativo, la acción se invierte. El diodo de abajo conduce y el diodo de arriba entra en zona zener. De esta manera la salida es casi una onda cuadrada. Cuanto mayor sea la onda sinusoidal de entrada, más perfecta será la onda cuadrada de salida.

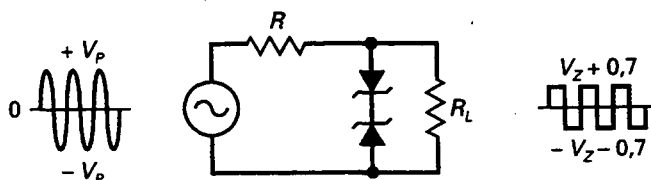


Figura 5-8. Diodo zener usado para conformación de onda.

EJEMPLO 5-6

Describe brevemente lo que hacen cada uno de los circuitos de la Figura 5-9.

SOLUCIÓN

La Figura 5-9a muestra cómo los diodos zener y los diodos normales de silicio pueden producir varias tensiones de salida continuas dada una fuente de alimentación de 20 V. El diodo inferior produce una salida de 10 V. Cada diodo de silicio está polarizado

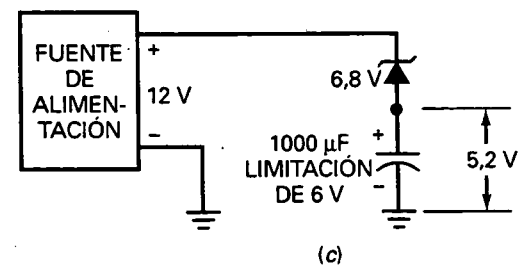
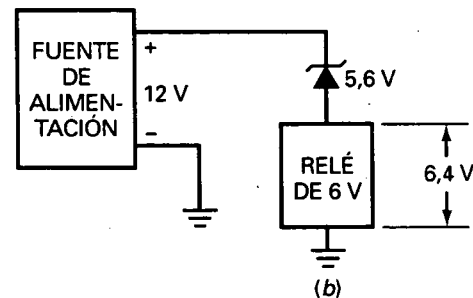
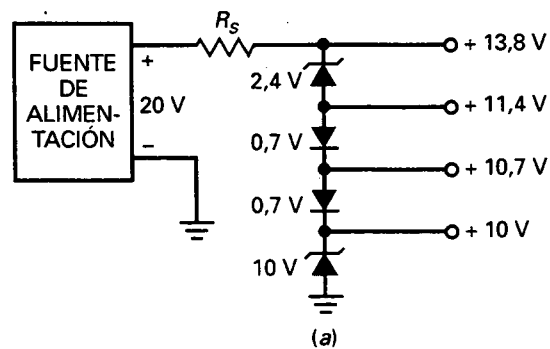


Figura 5-9. Aplicaciones zener. a) Produciendo tensiones de salida no estándar; b) usando un relé de 6 V en un sistema de 12 V; c) empleando un condensador de 6 V en un sistema de 12 V.

en directa, produciendo salidas de 10,7 V y 11,4 V, como se muestra. El diodo superior tiene una tensión de ruptura de 2,4 V, dando una salida de 13,8 V. Con otras combinaciones de zener y diodo de silicio un circuito como éste puede producir diferentes tensiones continuas de salida.

Si trata de conectar un relé de seis voltios a un sistema de 12 V probablemente dañará el relé. Es necesario hacer caer algo de tensión. La Figura 5-9b muestra una forma de hacerlo. Conectando un diodo zener de 5,6 V en serie con el relé sólo aparecen 6,4 voltios a través del relé, lo que está dentro de la tolerancia de los límites de tensión del relé.

Los condensadores electrolíticos grandes a menudo tienen límites de tensión pequeños. Por ejemplo, un condensador electrolítico de 1.000 μ F puede tener un límite de tensión de sólo 6 V. Esto significa que la tensión máxima a través del condensador debería ser menor de 6 V. La Figura 5-9c muestra una forma de solucionarlo en la que un condensador electrolítico de 6 V se usa con una fuente de alimentación de 12 V. De nuevo, la idea consiste en usar un diodo zener para bajar la tensión. En este caso el diodo zener tiene una caída de 6,8 V, dejando sólo 5,2 V a través del condensador. De esta forma el condensador electrolítico puede filtrar la fuente de alimentación y permanecer dentro de sus límites de tensión.

5-3. SEGUNDA APROXIMACIÓN DE UN DIODO ZENER

La Figura 5-10a muestra la segunda aproximación de un diodo zener. Una resistencia zener está en serie con una batería ideal. La tensión total a través del diodo zener es igual a la tensión de ruptura más la caída de tensión a través de la resistencia zener. Como R_z es relativamente pequeña en un diodo zener, ésta tiene sólo un pequeño efecto en la tensión total a través del diodo zener.

□ Efecto en la tensión en la carga

¿Cómo podemos calcular el efecto de la resistencia zener en la tensión en la carga?

La Figura 5-10b muestra una fuente de alimentación excitando un regulador zener con carga. Idealmente, la tensión en la carga es igual a la tensión de ruptura V_z . Pero en la segunda aproximación incluimos la resistencia zener, como se muestra en la Figura 5-10c. La caída de tensión adicional a través de R_z incrementará ligeramente la tensión en la carga.

Como la corriente zener circula a través de la resistencia zener en la Figura 5-10c, la tensión en la carga viene dada por:

$$V_L = V_z + I_z R_z$$

Como se puede observar, el cambio en la tensión en la carga respecto al caso ideal es:

$$\Delta V_L = I_Z R_Z \quad (5-7)$$

Normalmente, R_Z es pequeña, de tal forma que la tensión cambia poco, típicamente decenas de voltios. Por ejemplo, si $I_Z = 10 \text{ mA}$ y $R_Z = 10 \Omega$, entonces $\Delta V_L = 0,1 \text{ V}$.

□ Efecto en el rizado

Por lo que respecta al rizado, podemos usar el circuito equivalente mostrado en la Figura 5-11a. En otras palabras, las únicas componentes que afectan al rizado son las tres resistencias que se muestran. Podemos simplificar esto incluso más. En un diseño típico, R_Z es mucho menor que R_L ; por tanto, las únicas dos componentes que tienen un efecto significativo en el rizado son la resistencia serie y la resistencia zener mostrada en la Figura 5-11b.

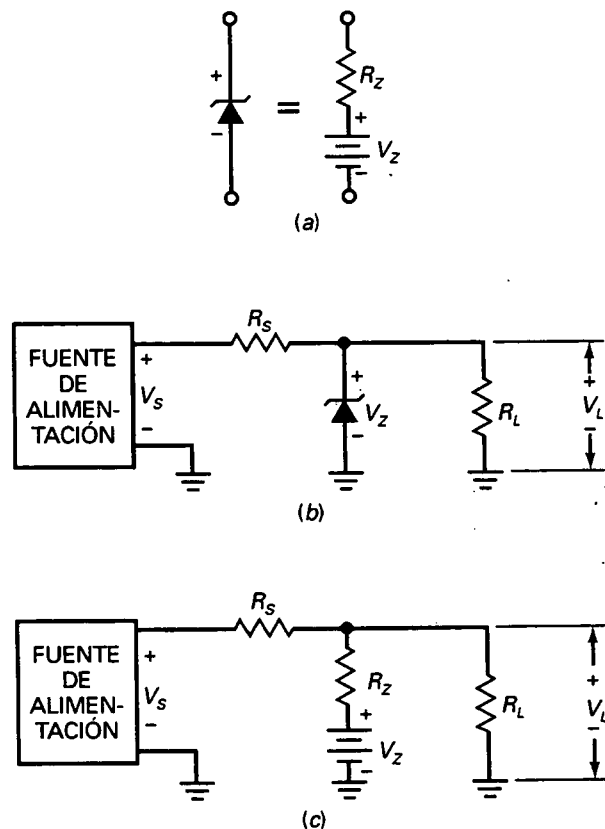


Figura 5-10. Segunda aproximación de un diodo zener. a) Circuito equivalente; b) fuente de alimentación excita un regulador zener; c) resistencia zener incluida en el análisis.

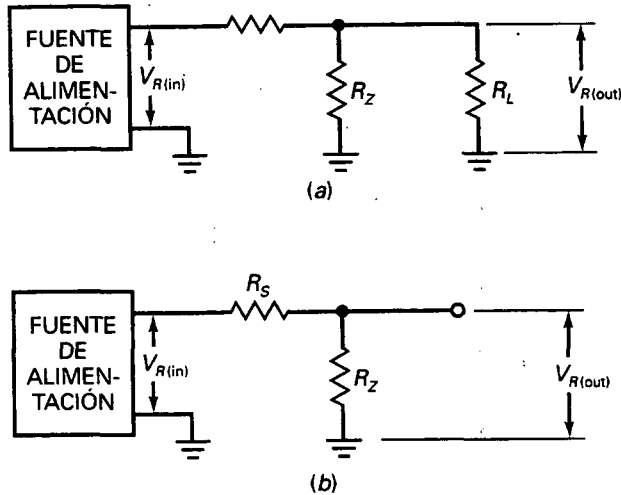


Figura 5-11. El regulador zener reduce el rizado. *a)* Circuito equivalente para señal completo; *b)* circuito equivalente para señal simplificado.

Como la Figura 5-11*b* es un divisor de tensión, podemos escribir la siguiente ecuación para el rizado de salida:

$$V_{R(out)} = \frac{R_Z}{R_S + R_Z} V_{R(in)}$$

Los cálculos del rizado no son críticos; es decir, no tienen que ser exactos. Como R_S es siempre mucho mayor que R_Z en un diseño típico, podemos usar esta aproximación para las detecciones de averías y análisis preliminares:

$$V_{R(out)} \approx \frac{R_Z}{R_S} V_{R(in)} \quad (5-8)$$

EJEMPLO 5-7

El diodo zener de la Figura 5-12 tiene una tensión de ruptura de 10 V y una resistencia zener de 8.5 Ω . Calcular la tensión en la carga cuando la corriente zener es 20 mA, utilizando la segunda aproximación.

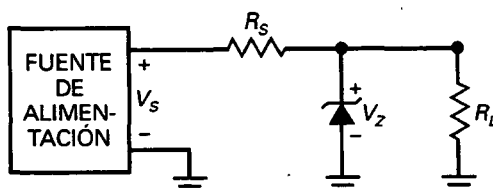


Figura 5-12. Regulador zener con carga.

SOLUCIÓN

El cambio en la tensión en la carga es igual a la corriente zener multiplicada por la resistencia zener:

$$\Delta V_L = I_Z R_Z = (20 \text{ mA})(8,5 \Omega) = 0,17 \text{ V}$$

En una segunda aproximación, la tensión en la carga es:

$$V_L = 10 \text{ V} + 0,17 \text{ V} = 10,17 \text{ V}$$

EJEMPLO 5-8

En la Figura 5-12, $R_S = 270 \Omega$, $R_L = 8,5 \Omega$ y $V_{R(\text{in})} = 2 \text{ V}$. ¿Cuál es la tensión de rizado aproximada a través de la carga?

SOLUCIÓN

El rizado en la carga es aproximadamente igual a la relación entre R_Z y R_S , multiplicado por el rizado en la entrada:

$$V_{R(\text{out})} \approx \frac{8,5 \Omega}{270 \Omega} 2 \text{ V} = 63 \text{ mV}$$

EJEMPLO 5-9

Suponiendo que el diodo zener tiene una tensión de ruptura de 10 V y una resistencia zener de 8,5 Ω , ¿cuál es la tensión adicional cuando la corriente es de 20 mA?

SOLUCIÓN

Si calculamos las tensiones en la Figura 5-13 usando los métodos discutidos anteriormente obtendremos los siguientes resultados. Con un transformador 8:1, la tensión de pico del secundario es 21,2 V. Reste dos caídas de tensión de dos diodos y obtendrá un pico de 19,8 V a través del condensador del filtro. La corriente a través de la resistencia de 390 Ω es 51 mA, y la corriente a través de R_S es 36 mA. El condensador tiene que alimentar la suma de estas dos corrientes, que es 87 mA. Con la ecuación (4-10), esta corriente produce un rizado a través del condensador de aproximadamente 2,7 V pp. Con esto podemos calcular el rizado que sale del regulador zener, que es aproximadamente 85 mV pp.

Como el rizado es grande, la tensión a través del condensador varía desde 19,8 V hasta 17,1 V. Si se promedian estos dos valores obtenemos 18,5 V como la tensión continua aproximada a través del condensador del filtro. Esta menor tensión continua significa que los rizados de la entrada y la salida calculados previamente también serán menores. Como se discutió en el capítulo anterior, los cálculos como éstos son solo estimaciones, porque el análisis exacto tiene que incluir efectos de orden superior.

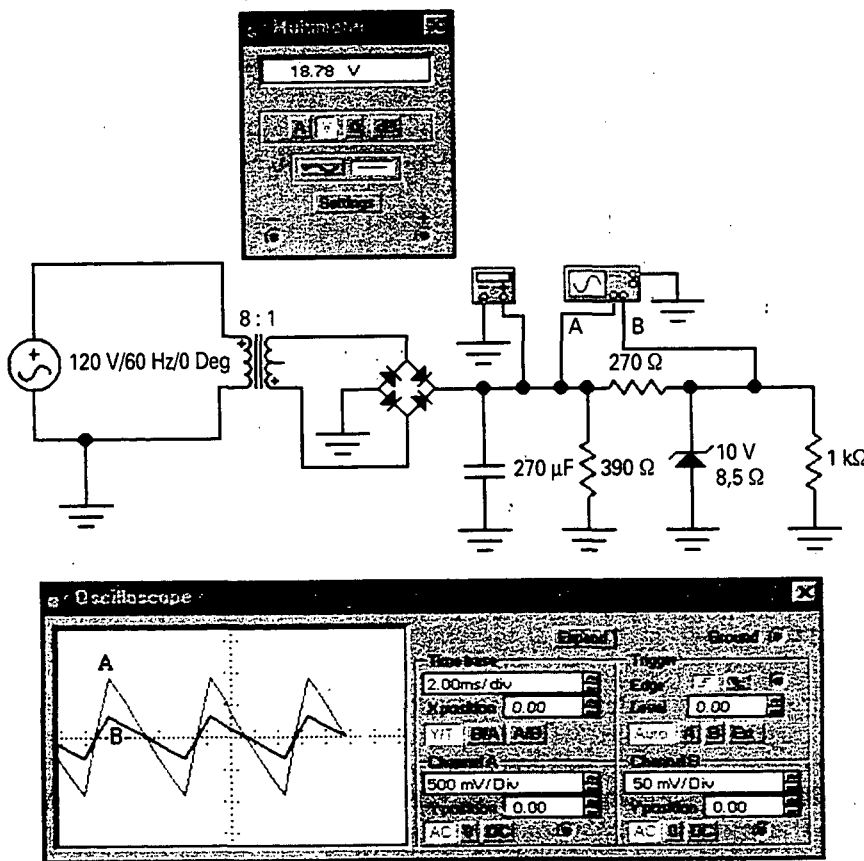


Figura 5-13. Análisis en simulación (EWB) del rizado de un regulador zener.

Ahora veamos las medidas de la simulación, que son casi respuestas exactas: El polímetro lee 18.78 V, muy cerca del valor estimado de 18.5 V. El canal A del osciloscopio muestra el rizado a través del condensador. Es aproximadamente 2 V pp, algo menor que los 2.7 V pp estimados, pero es una estimación razonable. Y finalmente, el rizado y la salida del regulador zener es aproximadamente 60 mV pp (canal B) en lugar de 85 mV pp. De nuevo, el rizado real es menor, pero todavía razonablemente cerca para propósitos de detección de averías y análisis preliminares.

5-4. PUNTO LÍMITE DE FUNCIONAMIENTO EN LA ZONA ZENER

Para que un regulador zener pueda mantener constante la tensión de salida, el diodo zener debe permanecer en la zona de ruptura en todas las condiciones de funcionamiento, lo que equivale a decir que debe haber corriente por el zener para todas las tensiones de fuente y todas las corrientes por la carga.

❑ Condiciones del peor caso

La Figura 5-14a muestra un regulador zener. Tiene las siguientes corrientes:

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S} = \frac{20 \text{ V} - 10 \text{ V}}{200 \Omega} = 50 \text{ mA}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$$

y

$$I_Z = I_S - I_L = 50 \text{ mA} - 10 \text{ mA} = 40 \text{ mA}$$

Ahora, consideraremos qué sucede cuando la tensión de la fuente decrece desde 20 hasta 12 V. En los cálculos anteriores se puede ver que I_S decrecerá, I_L permanecerá igual, I_Z disminuirá. Cuando V_S es igual a 12 V, I_S será igual a 10 mA, $I_Z = 0$. Con esta tensión de fuente tan baja, el diodo zener está a punto de salirse de la región de ruptura. Si la fuente decrece más, la regulación se perderá. En otras palabras, la tensión en la carga se hará menor que 10 V. Por tanto, una tensión de fuente baja puede causar que el circuito zener falle en la regulación.

Otra forma de perder la regulación consiste en tener demasiada corriente por la carga. En la Figura 5-14a considere lo que sucede cuando la resistencia de carga decrece de 1 k Ω a 200 Ω . Cuando la resistencia de carga es 200 Ω , la corriente por la carga se incrementa hasta 50 mA y la corriente zener decrece a cero. De nuevo el diodo zener está a punto de salirse de la región de ruptura. Por tanto, un circuito zener dejará de regular si la resistencia de carga es demasiado baja.

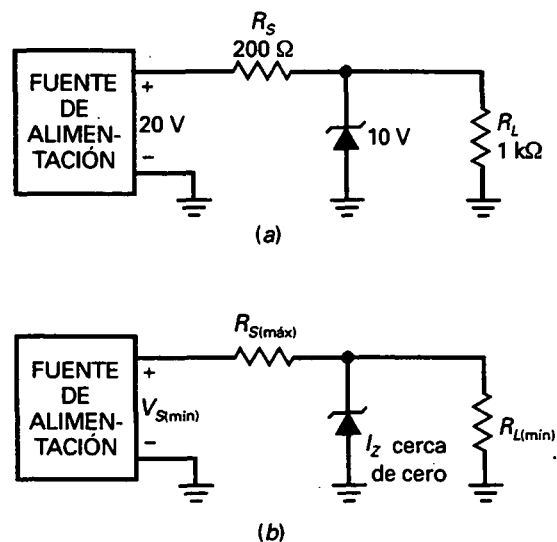


Figura 5-14. Regulador zener. a) Funcionamiento normal; b) condiciones del peor caso en el límite del mal funcionamiento.

Finalmente, consideraremos lo que sucede cuando R_s crece desde $200\ \Omega$ hasta $1\ \text{k}\Omega$. En este caso, la corriente en serie decrece de 50 a 10 mA. Por ello, una resistencia en serie alta puede hacer que el circuito deje de regular correctamente.

La Figura 5-14b resume las ideas anteriores mostrando las condiciones del peor caso. Cuando la corriente zener está cerca de cero, la regulación zener se aproxima a la condición de fallo. Analizando el circuito para estas condiciones del peor caso es posible derivar la siguiente ecuación:

$$R_{S(\text{máx})} = \left(\frac{V_{S(\text{mín})}}{V_Z} - 1 \right) R_{L(\text{mín})} \quad (5-9)$$

También es útil una forma alternativa de esta ecuación:

$$R_{S(\text{máx})} = \frac{V_{S(\text{mín})} - V_Z}{I_{L(\text{máx})}} \quad (5-10)$$

Estas dos ecuaciones son útiles porque se puede comprobar si un regulador zener fallará bajo algunas condiciones de operación.

EJEMPLO 5-10

Un regulador zener tiene una tensión de entrada que puede variar de 22 a 30 V. Si la tensión de salida regulada es de 12 V y la resistencia de carga varía de $140\ \Omega$ a $10\ \text{k}\Omega$, ¿cuál es la máxima resistencia en serie permitida?

SOLUCIÓN

Se usa la Ecuación (5-9) para calcular la máxima resistencia en serie:

$$R_{S(\text{máx})} = \left(\frac{22\ \text{V}}{12\ \text{V}} - 1 \right) 140\ \Omega = 117\ \Omega$$

Mientras la resistencia en serie sea menor que $117\ \Omega$, el regulador zener funcionará correctamente bajo todas las condiciones de operación.

EJEMPLO 5-11

Un regulador zener tiene una tensión de entrada de 15 a 20 V y una corriente por la carga de 5 a 20 mA. Si la tensión zener es de 6.8 V, ¿cuál deberá ser el valor de la resistencia en serie?

SOLUCION

Se emplea la Ecuación (5-10) para calcular la máxima resistencia en serie:

$$R_{S(\max)} = \frac{15\text{ V} - 6.8\text{ V}}{20\text{ mA}} = 410\ \Omega$$

Mientras la resistencia en serie sea menor que $410\ \Omega$, el regulador zener funcionará correctamente bajo todas las condiciones de operación.

5-5. CÓMO LEER UNA HOJA DE CARACTERÍSTICAS

En el Apéndice se muestra la hoja de características para la serie 1N746 de diodos zener. Esta hoja de características también sirve para la serie 1N957 y la serie 1N4370. Consulte las hojas de características en el siguiente estudio. De nuevo en este caso, la mayor parte de la información de una hoja de características es para los diseñadores, pero a continuación se dan algunos datos que incluso quienes detectan averías y hacen pruebas deberían saber.

□ Potencia máxima

La disipación de potencia de un diodo zener es igual al producto de su tensión por su corriente:

$$P_z = V_z I_z \quad (5-11)$$

Por ejemplo, si $V_z = 12\text{ V}$ e $I_z = 10\text{ mA}$, entonces:

$$P_z = (12\text{ V})(10\text{ mA}) = 120\text{ mW}$$

Siempre que P_z sea menor que la limitación de potencia, el diodo zener podrá funcionar en la zona de ruptura sin que se destruya. Los diodos zener disponibles comercialmente tienen limitaciones de potencia desde $1/4$ hasta más de 50 W .

Por ejemplo, la hoja de características relativa a la serie 1N746 indica una potencia máxima de 400 mW . Un diseño robusto incluye un factor de seguridad para mantener la disipación de potencia muy por debajo de este máximo de 400 mW . Como se ha dicho antes, en los diseños conservadores se emplean factores de seguridad de 2 o más.

□ Corriente máxima

Las hojas de características normalmente incluyen la corriente máxima que puede circular por un diodo zener sin exceder su límite de potencia. Esta

corriente máxima está relacionada con la potencia máxima de la forma siguiente:

$$I_{ZM} = \frac{P_{ZM}}{V_Z} \quad (5-12)$$

donde:

I_{ZM} = corriente máxima por el diodo zener
 P_{ZM} = limitación de potencia máxima
 V_Z = tensión zener

Por ejemplo, el 1N759 tiene una tensión zener de 12 V. Por tanto, su corriente máxima es

$$I_{ZM} = \frac{400 \text{ mW}}{12 \text{ V}} = 33,3 \text{ mA}$$

La hoja de características proporciona dos limitaciones de corriente máxima: 30 y 35 mA. Obsérvese que estos valores incluyen nuestra respuesta teórica de 33,3 mA. La hoja de características proporciona dos valores debido a la tolerancia en la tensión zener.

Si se satisface la limitación de corriente, automáticamente se satisface la limitación de potencia. Por ejemplo, si la corriente se mantiene menor de 33,3 mA, al mismo tiempo la disipación de potencia se mantiene menor de 400 mW. Si se incluye un factor de seguridad igual a 2, ya no hay por qué preocuparse de que el diodo se queme a causa de un diseño poco común.

□ Tolerancia

La nota 1 en la hoja de características muestra estas tolerancias:

- Serie 1N4370: ± 10 por 100, sufijo A para ± 5 por 100.
- Serie 1N746: ± 10 por 100, sufijo A para ± 5 por 100.
- Serie 1N957: ± 20 por 100, sufijo A para ± 10 por 100, sufijo B para ± 5 por 100.

Por ejemplo, un 1N967 tiene una tensión zener de 18 V con una tolerancia de ± 20 por 100. El 1N967A tiene las mismas tensiones zener con una tolerancia de ± 10 por 100, y el 1N967B tiene la misma tensión con una tolerancia de ± 5 por 100.

□ Resistencia zener

La resistencia zener (también llamada *impedancia zener*) puede designarse por R_{ZT} o por Z_{ZT} . Por ejemplo, el 1N961 tiene una resistencia zener de 8,5 Ω medida a una corriente de prueba de 12,5 mA. Mientras la corriente zener se mantenga por encima del codo de la curva, puede tomarse 8,5 Ω como el valor aproximado de la resistencia zener. Pero obsérvese que la resistencia zener aumenta en el codo de la curva (700 Ω). Lo importante es que el punto

de funcionamiento debe estar cerca de la corriente de prueba, si es posible. En ese caso se sabe que la resistencia zener es relativamente pequeña.

La hoja de características contiene una gran cantidad de información adicional, pero está dirigida básicamente a los diseñadores. Si el lector trabajase en diseño, entonces tendría que leer con mucho detenimiento la hoja y también las notas que indican cómo fueron medidas las características.

□ Ajuste

El *factor de ajuste* que se incluye en las hojas de características indica cuánto hay que reducir la limitación de potencia de un dispositivo. La serie 1N746, por ejemplo, tiene una limitación de potencia de 400 mW para una temperatura de 50 °C. El factor de ajuste que se da es de 3,2 mW/°C, lo que significa que se deben restar 3,2 mW por cada grado que rebase los 50 °C. Aunque no se esté trabajando en diseño, hay que tener cuidado con el efecto de la temperatura. Si se sabe que la temperatura superará los 50 °C, el diseñador tiene que ajustar o reducir la limitación de potencia del diodo zener.

5-6. DETECCIÓN DE AVERÍAS

En la Figura 5-15 se muestra un regulador zener. Si el circuito está funcionando adecuadamente, la tensión entre A y masa debe ser de +18 V, la tensión entre B y masa debe ser de +10 V y la tensión entre C y masa debe ser de +10 V.

□ Síntomas característicos

Ahora veamos qué es lo que podría fallar en el circuito. Cuando un circuito no está funcionando correctamente, la persona que va a detectar la avería comienza, en general, midiendo tensiones. Estas mediciones de tensión dan pistas que ayudan a aislar el problema. Supóngase, por ejemplo, que se miden estas tensiones en los nudos:

$$V_A = +18 \text{ V} \quad ; \quad V_B = +10 \quad ; \quad V_C = 0$$

Lo que detectando averías se podría pensar después de haber medido las tensiones anteriores es lo siguiente:

¿Esta abierta la resistencia de carga? No, la tensión en la carga seguiría siendo de +10 V. ¿Y si la resistencia de carga estuviese en cortocircuito? No, pues eso llevaría a masa B y C, produciendo 0 V. ¿Y si el cable de conexión entre B y C estuviese abierto? Sí, eso podría ser.

Este fallo produce síntomas característicos. La única forma de obtener este conjunto de tensiones es con una conexión abierta entre B y C.

❑ Síntomas ambiguos

No todas las averías producen síntomas característicos, pues a veces varias generan el mismo conjunto de tensiones. He aquí un ejemplo: supóngase que el detector de averías mide estas tensiones:

$$V_A = +18 \text{ V} ; V_B = 0 ; V_C = 0$$

¿En qué consiste la avería? Reflexionemos unos minutos. Cuando tenga la respuesta, lea lo siguiente.

Un detector de averías podría hallar el problema de esta manera. Sus consideraciones serían quizá éstas:

Hay tensión en A, pero no en B ni en C. ¿Y si la resistencia en serie estuviese abierta? Entonces no podría haber tensión en B o C, pero aun mediría +18 V entre A y masa. Sí, la resistencia en serie probablemente está abierta.

En este punto, el detector de averías desconectaría la resistencia en serie y mediría su resistencia con un óhmetro. Cabe la posibilidad de que estuviese abierta. Pero supóngase que la medida indica una resistencia en buen estado. Entonces el detector de averías debería proceder como sigue:

Qué extraño. ¿Hay alguna otra forma de obtener +18 V en A y 0 V en B y C? Puede estar el diodo zener en cortocircuito? ¿Y si la resistencia de la carga estuviese en cortocircuito? ¿Y si entre B y masa, o entre C y masa hubiese una salpicadura de soldadura? Cualquiera de estas causas podría originar los síntomas que observo.

Ahora el detector de averías desconoce más causas posibles para explicar el origen del problema. Finalmente, hallará cuál es la avería.

Cuando los componentes se queman, por lo general, se ponen en circuito abierto, pero no siempre. Algunos dispositivos semiconductores pueden generar cortocircuitos internos, en cuyo caso son como resistencias nulas. Otras causas que pueden producir cortocircuitos son las salpicaduras de soldadura entre las pistas de una tarjeta de circuito impreso, una gota de soldadura que toque dos pistas, etc. Por ello, es necesario plantearse hipótesis que tengan en cuenta los componentes en cortocircuito y los componentes abiertos.

❑ Tabla de averías

La Tabla 5-2 muestra las posibles averías del regulador zener de la Figura 5-15. Al trabajar con tensiones, recuerde esto: un componente en cortocircuito es equivalente a una resistencia nula, mientras que un componente abierto es equivalente a una resistencia infinita. Si tiene problemas con los cálculos al usar cero e infinito, entonces emplee $0,001 \Omega$ y $1.000 \text{ M}\Omega$. En

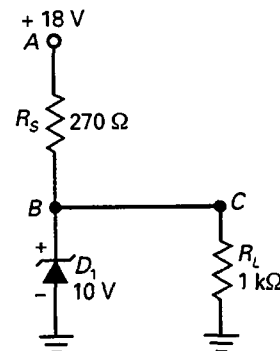


Figura 5-15.
Detección de averías
en un regulador zener.

otras palabras, emplee una resistencia muy pequeña en vez de un cortocircuito, y una resistencia muy grande en lugar de un circuito abierto.

En la Figura 5-15, la resistencia en serie R_S puede estar en cortocircuito o en circuito abierto. Designemos estas averías como R_{SS} y R_{SO} . Análogamente, el diodo zener puede estar en cortocircuito o abierto y lo simbolizaremos mediante D_{IS} y D_{IO} . Además, la resistencia de carga puede estar en cortocircuito o abierta, R_{LS} y R_{LO} . Finalmente, el conductor de conexión entre B y C puede estar abierto, denominado BC_O .

En la Tabla 5-2, la segunda fila muestra las tensiones cuando la avería es R_{SS} , una resistencia en serie cortocircuitada. Si la resistencia en serie estuviese en cortocircuito en la Figura 5-15 aparecerían +18 V en B y C , lo que destruiría el diodo zener y posiblemente la resistencia de carga. Para esta avería un voltímetro mediría 18 V en A , B y C . Esta avería y sus tensiones se muestran en la Tabla 5-2.

Si la resistencia en serie estuviese abierta en la Figura 5-15 entonces no habría tensión en B . En este caso, B y C tendrían tensión cero, como se muestra en la Tabla 5-2. Continuando así, se pueden obtener las demás entradas que se ven en la Tabla 5-2.

En la Tabla 5-2, los comentarios indican averías que podrían ocurrir como consecuencia directa de los cortocircuitos originales.

Por ejemplo, una R_S en cortocircuito destruirá el diodo zener y también puede quemar la resistencia de carga. Depende de la limitación de potencia de la resistencia de carga. Una R_S en cortocircuito significa que hay 18 V a través de 1 k Ω . Esto produce una potencia de 0,324 W. Si la resistencia de carga tiene una limitación de apenas 0,25 W, entonces se quemará.

Algunas de las averías en la Tabla 5-2 producen tensiones únicas y otras producen tensiones ambiguas. Por ejemplo, las tensiones para R_{SS} , D_{IO} , BC_O y «Sin alimentación» son únicas. Si se miden estas tensiones puede identificar la avería sin entrar a hacer medidas en el circuito con un óhmetro.

Por otro lado, todas las demás averías de la Tabla 5-2 producen tensiones ambiguas. Si se miden un conjunto de tensiones ambiguas se necesitará entrar en el circuito y medir la resistencia de los componentes sospechosos. Por ejemplo, suponga que mide 18 V en A , 0 V en B y 0 V en C . Las averías que pueden producir estas tensiones son R_{SO} , D_{IS} y R_{LS} .

Después de estudiar la Tabla 5-2 puede practicar la detección de averías con el detector de averías al final de este capítulo.

Tabla 5-2. Averías y síntomas de un regulador zener

Averías	V_A (V)	V_B (V)	V_C (V)	Comentarios
Ninguna	18	10	10	Ningún problema
R_{SS}	18	18	18	D_1 y R_L pueden estar abiertos
R_{SO}	18	0	0	R_S puede estar abierta
D_{IS}	18	0	0	
D_{IO}	18	14,2	14,2	R_S puede estar abierta
R_{LS}	18	0	0	
R_{LO}	18	10	10	Comprobar la alimentación de potencia
BC_O	18	10	0	
Sin alimentación	0	0	0	

5-7. RECTAS DE CARGA

La corriente en el diodo zener de la Figura 5-16a viene dada por:

$$I_Z = \frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Supóngase, por ejemplo, que $V_S = 20\text{ V}$ y $R_S = 1\text{ k}\Omega$. Entonces, la ecuación precedente se reduce a:

$$I_Z = \frac{20 - V_Z}{1.000}$$

Como antes, el punto de saturación (intersección vertical) se obtiene haciendo V_Z igual a cero, obteniendo una I_Z de 20 mA. De la misma manera, para obtener el punto de corte (intersección horizontal) se hace I_Z igual a cero, con lo que obtenemos $V_Z = 20\text{ V}$.

De modo alternativo, los extremos de la recta de carga se pueden obtener como sigue. Piense en la Figura 5-16a con $V_S = 20\text{ V}$ y $R_S = 1\text{ k}\Omega$. Con el diodo zener en cortocircuito, la corriente máxima por el diodo es de 20 mA. Con el diodo abierto, la tensión máxima en el diodo es de 20 V.

Supóngase que el diodo zener tiene una tensión de ruptura de 12 V. Entonces su curva es como la que se ve en la Figura 5-16b. Cuando se traza la recta de carga para $V_S = 20\text{ V}$ y $R_S = 1\text{ k}\Omega$, se obtiene la recta de carga de arriba con un punto de intersección Q_1 . La tensión del diodo zener será ligeramente mayor que la tensión de codo de ruptura, ya que la curva está ligeramente inclinada.

Para entender el funcionamiento de la regulación de tensión se supone que la tensión de la fuente cambia a 30 V. Entonces la corriente zener cambia a:

$$I_Z = \frac{30 - V_Z}{1.000}$$

Este cambio implica que los extremos de la recta de carga son 30 mA y 30 V, como se ve en la Figura 5-16b. La nueva intersección se sitúa en Q_2 . Comparando Q_2 con Q_1 se puede apreciar que hay más corriente por el diodo zener, pero hay aproximadamente la misma tensión zener. Por tanto, a pesar de que la tensión de la fuente ha pasado de 20 a 30 V, la tensión zener sigue siendo aproximadamente igual a 12 V. Ésta es la idea básica en la regulación de tensión; la tensión de salida se ha mantenido casi constante incluso cuando la tensión de entrada ha sufrido un cambio bastante grande.

5-8. DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

La optoelectrónica es la tecnología que combina la óptica con la electrónica. Este campo incluye muchos dispositivos basados en la acción de una unión *pn*. Ejemplos de dispositivos optoelectrónicos son los diodos emisores de luz (LED), los fotodiodos, los optoacopladores, etc. Nuestro estudio comienza por los LED.

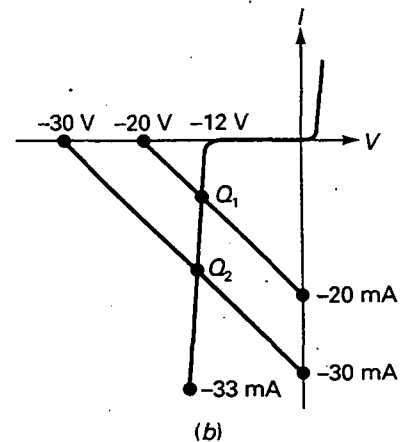
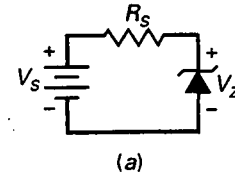


Figura 5-16. Análisis de la recta de carga de un regulador zener.

□ Diodo emisor de luz (LED)

En la Figura 5-17a se ve una fuente conectada a una resistencia y un LED. Las flechas que salen simbolizan la luz radiada. En un LED con polarización directa los electrones libres atraviesan la unión y caen en los huecos. Como caen de niveles energéticos altos a niveles bajos, emiten energía. En los diodos normales esta energía se disipa en forma de calor, pero en un LED lo hace en forma de luz. Los LED han sustituido a las lámparas incandescentes en muchas aplicaciones porque necesitan muy poca tensión, tienen una larga vida y conmutan muy rápido.

Empleando elementos como el galio, el arsénico y el fósforo, un fabricante puede producir LED que emitan luz roja, verde, amarilla, azul, naranja o infrarroja (invisible). Los LED que producen radiación visible son útiles en los instrumentos, las calculadoras, etc., mientras que los de luz infrarroja tienen aplicaciones en sistemas de alarma antirrobo, reproductores de CD y otros dispositivos en los que se requiera luz invisible.

□ Tensión y corriente en un LED

La resistencia que aparece en la Figura 5-17b es la resistencia limitadora de corriente habitual que evita que la corriente exceda la corriente máxima del diodo. Como la resistencia tiene una tensión de V_s a la izquierda y de V_D a la derecha, la tensión es la diferencia entre estas dos tensiones. Por la ley de Ohm, la corriente en serie es:

$$I_s = \frac{V_s - V_D}{R_s} \quad (5-13)$$

En la mayor parte de los LED disponibles comercialmente, la caída de tensión típica es de 1,5 a 2,5 V para corrientes que fluctúan entre 10 y 50 mA. El valor exacto de la caída de tensión depende de la corriente que atraviesa el LED, el color, la tolerancia, etc. A menos que se diga otra cosa, en este libro supondremos una caída nominal de 2 V para la detección de averías o el análisis de circuitos con LED.

□ Luminosidad del LED

La luminosidad de un LED depende de la corriente. Cuando V_s es mucho mayor que V_D en la Ecuación (5-13), el brillo del LED es aproximadamente constante. Por ejemplo, un TIL222 es un LED verde con una tensión directa de entre 1,8 (mínimo) y 3 V (máximo), para una corriente de 25 mA. Si un

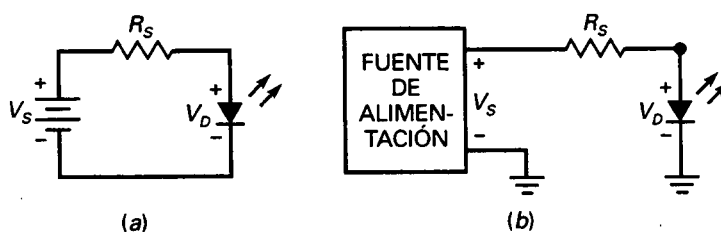


Figura 5-17. Indicador LED. a) Circuito básico; b) circuito práctico.

circuito como el de la Figura 5-17b se produce en serie usando un TIL222, el brillo del LED se hace constante si V_s es mucho mayor que V_D . Si V_s es sólo ligeramente mayor que V_D , el brillo del LED variará notablemente de un circuito al siguiente.

La mejor manera de controlar la luminosidad es excitar el LED con una fuente de corriente. De esta forma, el brillo es constante porque la corriente es constante. Cuando se expliquen los transistores (actúan como fuentes de corriente), mostraremos cómo se usan para excitar un LED.

□ Tensión de ruptura

Los LED tienen tensiones de ruptura bajas, típicamente entre 3 y 5 V, por lo que se destruyen fácilmente si se polarizan en inversa con demasiada tensión. Cuando se están detectando averías en un circuito con LED en el que el LED no brilla, se debe comprobar la polaridad de la conexión del LED para asegurarse de que está polarizado en directa.

A menudo se usa un LED para indicar la presencia de tensión de red en el equipo. En este caso se puede usar un diodo rectificador en paralelo con el LED para prevenir la destrucción del mismo por polarización inversa. Más tarde se da un ejemplo del uso de un rectificador para proteger un LED.

□ Indicador de siete segmentos

La Figura 5-18a muestra un *indicador de siete segmentos*. Contiene siete LED rectangulares (A a G), en el que cada uno recibe el nombre de *segmento* porque forma parte del símbolo que se está mostrando. La Figura 5-18b es un diagrama esquemático del indicador de siete segmentos. Se incluyen resistencias externas en serie para limitar la corriente a niveles de seguridad. Llevando a masa una o más resistencias, puede formarse cualquier dígito del 0 al 9. Por ejemplo, llevando a masa A, B y C se obtiene un 7. Llevando a masa A, B, C, D y G se obtiene un 3.

Con un indicador de siete segmentos se pueden formar también las letras A, C, E y F, y las letras minúsculas b y d. Los entrenadores de microprocesadores usan a menudo indicadores de siete segmentos para mostrar todos los dígitos del 0 al 9, más A, b, C, d, E y F.

El indicador de siete segmentos de la Figura 5-18b es del tipo de ánodo común porque todos los ánodos están conectados entre sí. También existe el tipo de cátodo común en que todos los cátodos están conectados entre sí.

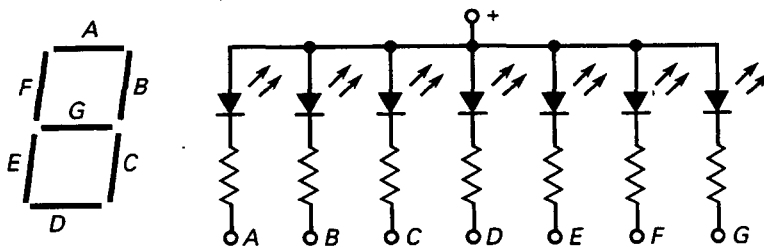


Figura 5-18. Indicador de siete segmentos. a) Disposición física de los segmentos; b) circuitos equivalentes.

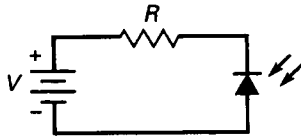


Figura 5-19. La luz incidente incrementa la corriente inversa en el fotodiodo.

□ Fotodiodo

Como ya se ha dicho, uno de los componentes de la corriente inversa en un diodo es el flujo de portadores minoritarios. La existencia de estos portadores se debe a que la energía térmica está continuamente desligando electrones de valencia de sus orbitales, produciendo durante este proceso electrones libres y huecos. El tiempo de vida de los portadores minoritarios es corto, pero mientras existen pueden contribuir a la corriente inversa.

Cuando la energía luminosa se proyecta sobre una unión *pn*, puede desligar electrones de valencia. Cuanta mayor intensidad de luz incida sobre la unión, mayor será la corriente inversa en el diodo. Un fotodiodo es un diodo cuya sensibilidad a la luz es máxima. En este tipo de diodos, una ventana permite que la luz pase por el encapsulado hasta la unión. La luz incidente produce electrones libres y huecos. Cuanto más intensa sea la luz, mayor será el número de portadores minoritarios y mayor será la corriente inversa.

La Figura 5-19 muestra el símbolo de un fotodiodo. Las flechas representan la luz incidente. Es especialmente importante recordar que la fuente y la resistencia en serie polarizan inversamente el fotodiodo. A medida que la luz se hace más intensa, la corriente inversa aumenta. En los fotodiodos típicos la corriente inversa es del orden de decenas de microamperios.

□ Optoacoplador

Un optoacoplador (llamado también *optoaislador* o aislador acoplado ópticamente) combina un LED y un fotodiodo en un solo encapsulado. La Figura 5-20 muestra un optoacoplador. Tiene un LED en el lado de entrada y un fotodiodo en el lado de salida. La tensión de la fuente de la izquierda y la resistencia en serie establecen una corriente en el LED. Entonces, la luz proveniente del LED incide sobre el fotodiodo, lo que genera una corriente inversa en el circuito de salida, que produce una tensión en la resistencia de salida. La tensión de salida es igual a la tensión de la fuente menos la tensión en la resistencia.

Si la tensión de entrada varía, la cantidad de luz también lo hará, lo que significa que la tensión de salida cambia de acuerdo con la tensión de entrada. Por ello, la combinación de un LED y un fotodiodo recibe el nombre de optoacoplador. El dispositivo puede acoplar una señal de entrada con el circuito de salida.

La ventaja fundamental de un optoacoplador es el aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y de salida. Mediante el optoacoplador, el único contacto que hay entre la entrada y la salida es un haz de luz. Por tal causa, es posible tener una resistencia de aislamiento entre los dos circuitos

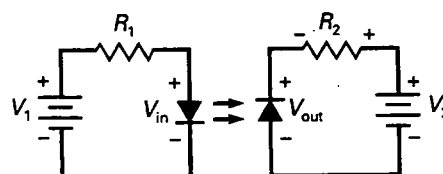


Figura 5-20. El optoacoplador combina un LED y un fotodiodo.

del orden de miles de $M\Omega$. Los aislamientos como éste son útiles en aplicaciones de alta tensión en las que los potenciales de los dos circuitos pueden diferir en varios miles de voltios.

□ Diodo láser

En un LED los electrones libres radian luz cuando caen de niveles de energía superior a niveles inferiores y lo hacen de forma aleatoria y continuamente, produciendo longitudes de onda con fases entre 0 y 360 grados. La luz que tiene muchas fases diferentes se llama *luz no coherente*, por consiguiente, un LED produce luz no coherente.

Un **diodo láser** es diferente en este aspecto, ya que *produce luz coherente*, lo que significa que todas las ondas luminosas están en fase entre sí. La idea básica de un diodo láser consiste en usar una cámara resonante con espejos que refuerza la emisión de ondas luminosas a la misma frecuencia y fase. A causa de esta resonancia, un diodo láser produce un haz de luz estrecho que es muy intenso, enfocado y puro.

El diodo láser también se conoce como láser semiconductor. Estos diodos pueden producir luz visible (roja, verde o azul) y luz invisible (infrarroja). Se usan en productos de consumo y comunicaciones de banda ancha. Entre los primeros encontramos diodos láser en reproductores de discos compactos e impresoras láser. En comunicaciones de banda ancha se usan con cables de fibra óptica para incrementar la velocidad en Internet.

Un cable de fibra óptica es análogo a un par trenzado, excepto que las trenzas son fibras de vidrio o plástico delgadas y flexibles que transmiten un haz de luz en lugar de los electrones libres. La ventaja consiste en que se puede enviar mucha más información a través de un cable de fibra óptica que a través de un cable de cobre.

EJEMPLO 5-12

La Figura 5-21a muestra un ensayo de polaridad de tensión. Se puede usar para comprobar una tensión continua de polaridad desconocida. Cuando la tensión continua es positiva, el LED verde se ilumina. Cuando la tensión continua es negativa, el LED rojo se enciende. ¿Cuál es la corriente aproximada del LED si la tensión de entrada continua es 50 V y la resistencia en serie es 2.2 k Ω ?

SOLUCIÓN

Usaremos una tensión directa de aproximadamente 2 V para cada LED. Con la Ecuación (5-13):

$$I_S = \frac{50\text{ V} - 2\text{ V}}{2.2\text{ k}\Omega} = 21.8\text{ mA}$$

EJEMPLO 5-13

La Figura 5-21b es un ensayo de continuidad. Después de que se apaga toda la alimentación en el circuito bajo prueba, usted puede

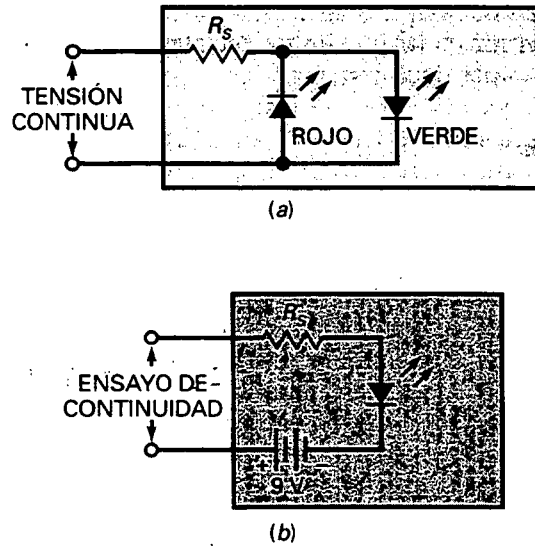


Figura 5-21. a) Indicador de polaridad; b) ensayo de continuidad.

usar este circuito para verificar la continuidad de los cables, conectores e interruptores. ¿Cuánta corriente hay en el LED si la resistencia en serie que es $470\ \Omega$?

SOLUCIÓN

Cuando los terminales de entrada están en corto (continuidad), la batería interna de 9 V produce una corriente en el LED de:

$$I_s = \frac{9\text{ V} - 2\text{ V}}{470\ \Omega} = 14.9\text{ mA}$$

EJEMPLO 5-14

Los LED se usan a menudo para indicar la existencia de tensiones alternas. La Figura 5-22 muestra una fuente de tensión alterna excitando un indicador LED. Cuando existe tensión alterna, hay

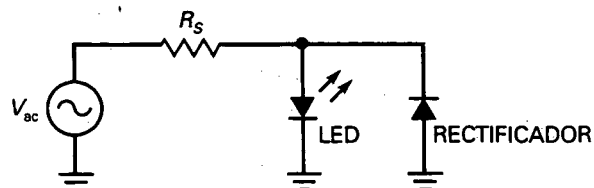


Figura 5-22. Indicador de tensión alterna baja.

corriente LED en la mitad positiva de los ciclos. En la mitad negativa de los ciclos, el diodo rectificado se enciende y protege el LED de tensiones inversas grandes. Si la fuente de tensión alterna es de 20 V rms y la resistencia en serie es 680 Ω , ¿cuál es la corriente media en el LED? También, calcule la disipación de potencia aproximada en la resistencia serie.

SOLUCIÓN

La corriente del LED es una señal rectificada de media onda. La tensión de pico de la fuente es $1,414 \times 20$ V, que es aproximadamente 28 V. Ignorando la caída de tensión en el LED, la corriente aproximada de pico es:

$$I_s = \frac{28 \text{ V}}{680 \Omega} = 41,2 \text{ mA}$$

La media de la corriente de media onda a través del LED vale:

$$I_s = \frac{41,2 \text{ mA}}{\pi} = 13,1 \text{ mA}$$

Ignore las caídas de tensión en los diodos de la Figura 5-22; esto es equivalente a decir que existe un corto a tierra en el extremo derecho de la resistencia de serie. Entonces la disipación de potencia en la resistencia serie es igual al cuadrado de la tensión de la fuente dividida por la resistencia:

$$P = \frac{(20 \text{ V})^2}{680 \Omega} = 0,588 \text{ W}$$

A medida que la tensión de la fuente en la Figura 5-22 se incrementa, la disipación de potencia en la resistencia serie se puede incrementar varios vatios. Esto es una desventaja, porque una resistencia de alta potencia es demasiado voluminosa y disipadora para la mayoría de las aplicaciones.

EJEMPLO 5-15

El circuito de la Figura 5-23 muestra un indicador LED para la tensión alterna de red. La idea es básicamente la misma que en la Figura 5-22, excepto que nosotros usamos un condensador en lugar de una resistencia. Si la capacidad es 0,68 μF , ¿cuál es la corriente media en el LED?

SOLUCIÓN

Calcule la reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi(60 \text{ Hz})(0,68 \mu\text{F})} = 3,9 \text{ k}\Omega$$

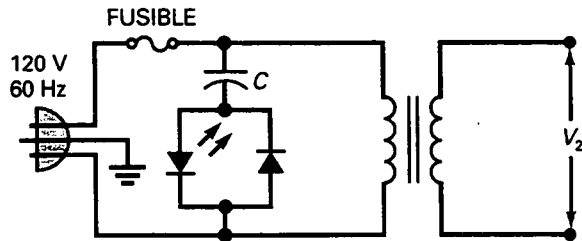


Figura 5-23. Indicador de tensión alterna alta.

Ignorando la caída de tensión en el LED, la corriente aproximada de pico del LED es:

$$I_s = \frac{170 \text{ V}}{3.9 \text{ k}\Omega} = 43.6 \text{ mA}$$

La corriente media en el LED:

$$I_s = \frac{43.6 \text{ mA}}{\pi} = 13.9 \text{ mA}$$

¿Qué ventaja tiene un condensador en serie sobre una resistencia en serie? Como la tensión y la corriente en un condensador están desfasadas 90° , no hay disipación de potencia en el condensador. Si una resistencia de $3.9 \text{ k}\Omega$ se usara en lugar de un condensador, tendría una disipación de potencia de aproximadamente 3.69 W . La mayoría de los diseñadores preferirían usar un condensador, ya que este es más pequeño e idealmente no produce calor.

EJEMPLO 5-16

¿Que hace el circuito de la Figura 5-24?

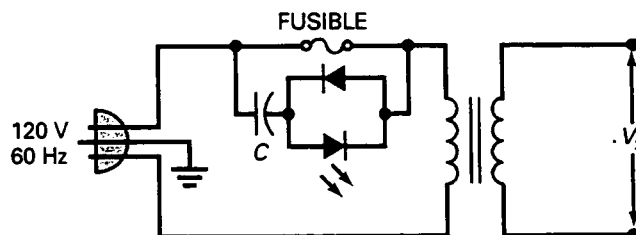


Figura 5-24. Indicador de fusible quemado.

SOLUCIÓN

Este es un indicador de fusible quemado. Si el fusible está bien, el LED está apagado porque hay tensión aproximadamente cero a través del indicador del LED. Por otro lado, si el fusible está abierto, algo de la tensión de red aparece a través del indicador del LED y este se enciende.

5-9. EL DIODO SCHOTTKY

A medida que la frecuencia crece, el funcionamiento de los diodos rectificadores de pequeña señal empieza a deteriorarse. Ya no son capaces de conmutar lo suficientemente rápido como para producir una señal de media onda bien definida. La solución a este problema es el *diodo Schottky*. Antes de describir este diodo de propósito específico, veamos el problema que aparece con los diodos normales de pequeña señal.

□ Almacenamiento de carga

La Figura 5-25a muestra un diodo de pequeña señal y la Figura 5-25b describe sus bandas de energía. Como se puede ver, los electrones de la banda de conducción se han difundido a través de la unión y se han desplazado hacia la zona *p* antes de recombinarse (trayectoria A). De forma similar, los huecos han cruzado la unión y se han movido hacia la zona *n* antes de recombinarse (trayectoria B). Cuanto mayor es el tiempo de vida, más lejos pueden viajar las cargas antes de que se recombinen.

Por ejemplo, si el tiempo de vida es de $1\ \mu\text{s}$, los electrones libres y los huecos existen durante un tiempo de $1\ \mu\text{s}$ antes de que se lleve a cabo la recombinación. Esto permite a los electrones libres penetrar profundamente en la zona *p*, donde permanecen temporalmente almacenados en la banda más alta de energía. Similarmente, los huecos penetran profundamente en la zona *n*, donde están temporalmente almacenados en la banda más baja de energía.

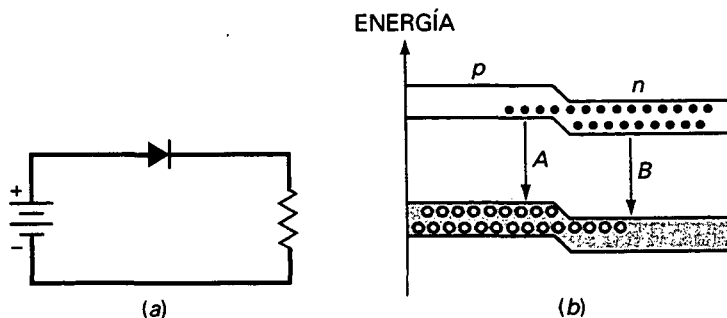


Figura 5-25. Almacenamiento de carga. a) La polarización directa crea cargas almacenadas; b) cargas almacenadas en bandas de alta y baja energía.

A mayor corriente directa, mayor es el número de cargas que han atravesado la unión. A mayor tiempo de vida, mayor la profundidad de penetración de estas cargas y mayor el tiempo que permanecen en las bandas de energía altas y bajas.

□ El almacenamiento de carga produce corriente inversa

Cuando se trata de conmutar un diodo de directa a inversa, la carga almacenada crea un problema. ¿Por qué? Porque si el diodo se polariza en inversa de manera repentina, las cargas almacenadas podrán circular en la dirección inversa durante un breve período de tiempo. Cuanto más largo sea el tiempo de vida, mayor será el tiempo durante el cual estas cargas puedan contribuir a la corriente inversa.

Supóngase, por ejemplo, que un diodo polarizado en directa se conmuta de repente a polarización inversa, como se ve en la Figura 5-26a. Entonces, durante unos instantes, podrá existir una gran corriente inversa debido a las cargas almacenadas que se muestran en la Figura 5-26b. La corriente inversa no se detendrá hasta que las cargas almacenadas hayan cruzado la unión o bien hasta que se hayan recombinado.

□ Tiempo de recuperación inverso

El tiempo que se tarda para que un diodo con polarización directa se corte se llama tiempo de recuperación inverso t_{rr} . Las condiciones para medir t_{rr} cambian de un fabricante a otro. Como guía, t_{rr} es el tiempo necesario para que la corriente inversa decaiga al 10 por 100 de la corriente en polarización directa.

Así, por ejemplo, el IN4148 tiene un t_{rr} de 4 ns. Si este diodo tiene una corriente en polarización directa de 10 mA y súbitamente se polariza en inversa, transcurrirán aproximadamente 4 ns para que la corriente inversa decrezca a 1 mA. El tiempo de recuperación inverso es tan corto en diodos para pequeña señal que su efecto pasa desapercibido a frecuencias menores que 10 MHz. Sólo cuando se trabaja muy por encima de los 10 MHz es necesario tener en cuenta t_{rr} .

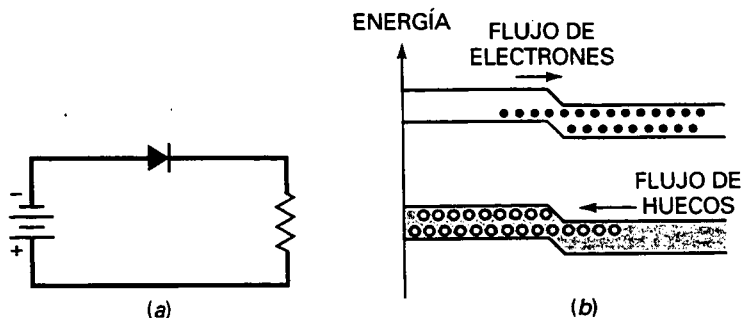


Figura 5-26. Las cargas almacenadas posibilitan una breve corriente inversa. a) Repentina inversión en la tensión de la fuente; b) flujo de cargas almacenadas en dirección inversa.

❑ Rectificación pobre a altas frecuencias

¿Cuál es el efecto del tiempo de recuperación inverso sobre la rectificación? Observe el rectificador de media onda de la Figura 5-27a. A frecuencias bajas la salida es una señal rectificada de media onda. A medida que la frecuencia aumenta hacia el orden de los MHz la señal de salida comienza a desviarse de su forma normal, como se observa en la Figura 5-27b. Se puede ver que hay una conducción apreciable (llamada *colas*) cerca del comienzo del semiciclo inverso.

El problema es que el tiempo de recuperación inverso se está convirtiendo en una parte significativa del período, permitiendo la conducción durante el principio del semiciclo negativo. Por ejemplo, si $t_r = 4$ ns y el período es de 50 ns, entonces la parte inicial del semiciclo inverso tendrá colas similares a las que se ve en la Figura 5-27b. Si la frecuencia continúa aumentando, el rectificador se hace inservible.

❑ Eliminando el almacenamiento de carga

La solución al problema de colas es un dispositivo de propósito específico denominado **diodo Schottky**. Este tipo de diodo usa un metal como el oro, la plata o el platino en un lado de la unión y silicio dopado (generalmente tipo n) en el otro. El metal a un lado de la unión provoca que el diodo Schottky no tenga zona de deplexión, y dicha carencia significa que *no hay cargas almacenadas en la unión*.

Cuando un diodo Schottky no tiene polarización, los electrones libres en el lado n se hallan en orbitales más pequeños que los electrones libres del lado metálico. A la diferencia en el tamaño de los orbitales se le llama **barra Schottky**, aproximadamente 0,25 V. Si el diodo tiene polarización directa, los electrones libres del lado n pueden ganar la energía suficiente para moverse en orbitales mayores. Por ello, los electrones libres pueden atravesar la unión y penetrar en el metal, produciendo una gran corriente de polarización directa. Como el metal no tiene huecos, no hay almacenamiento y, por tanto, tampoco hay tiempo de recuperación inverso.

❑ Diodo de portadores activos

El diodo Schottky se denomina a veces **diodo de portadores activos**. Este nombre se debe a que la polarización directa incrementa la energía de los

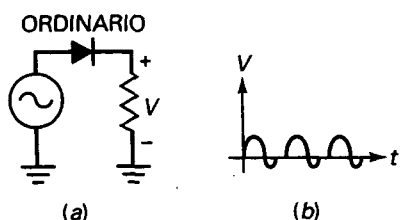


Figura 5-27. Las cargas almacenadas degradan el comportamiento del rectificador a frecuencias altas. a) Circuito rectificador con un diodo normal de pequeña señal; b) las colas aparecen en el semiciclo negativo a frecuencias altas.

electrones en el lado n a un nivel mayor que la de los electrones en el lado metálico de la unión. Este aumento de energía inspiró el nombre de **portadores activos** para los electrones del lado n . Tan pronto como estos electrones de alta energía cruzan la unión, caen en el metal, que tiene una banda de conducción de menor energía.

□ Conmutación rápida

La ausencia de almacenamiento de carga implica que el tiempo de recuperación inverso tiende a cero. Por lo cual, un diodo Schottky puede cortarse más rápidamente que un diodo ordinario. Cuando se usa en un circuito como el de la Figura 5-28a, el diodo Schottky produce una señal de media onda perfecta, como la de la Figura 5-28b, incluso con frecuencias superiores a los 300 MHz.

La Figura 5-28a muestra el símbolo esquemático de un diodo Schottky. Fíjese en el lado del cátodo. Las líneas parecen una S rectangular, que viene de Schottky. Por eso se puede recordar el símbolo esquemático.

□ Aplicaciones

Las aplicaciones más importantes de los diodos Schottky se hallan en las computadoras digitales. La velocidad de las computadoras depende de la rapidez con la que se puedan activar y desactivar sus diodos y sus transistores, y aquí es donde el diodo Schottky entra en escena. Como no tiene almacenamiento de carga, el diodo Schottky se ha convertido en el elemento clave de la TTL Schottky de baja potencia, un grupo de dispositivos digitales extensamente empleados.

Una indicación final: con polarización directa, un diodo Schottky tiene una barrera de potencial de sólo 0,25 V. Así, es posible ver diodos Schottky en puentes rectificadores de baja tensión, ya que solamente hay que restar 0,25 V en vez de los 0,7 V habituales por cada diodo cuando se usa la segunda aproximación. En una fuente de alimentación de baja tensión, esta menor caída de tensión del diodo es una ventaja.

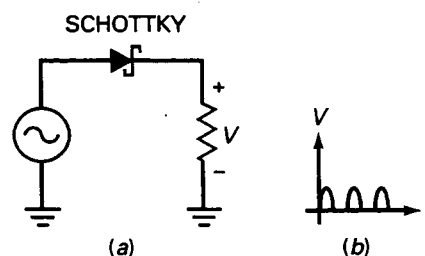


Figura 5-28. Los diodos Schottky eliminan las colas a altas frecuencias.
 a) Circuito con diodo Schottky; b) señal de media onda a 300 MHz.

5-10. EL VARICAP

El varicap (también llamado condensador controlado por tensión, epicap y diodo de sintonía) se usa mucho en receptores de televisión, receptores de FM y otros circuitos de comunicaciones porque se puede emplear para sintonización electrónica.

□ Idea básica

En la Figura 5-29a, la zona de deplexión se halla entre la zona p y la zona n . Las regiones p y n son como las placas de un condensador, y la zona de deplexión es como el dieléctrico. Cuando un diodo se polariza en inversa, la anchura de la zona de deplexión aumenta con la tensión inversa. Como la zona de deplexión se ensancha cuando la tensión inversa aumenta, la capacidad disminuye, como si las placas del condensador se separasen. El resultado es que la capacidad está controlada por la tensión.

□ Circuito equivalente y símbolo

En la Figura 5-29b se muestra el circuito equivalente para un diodo con polarización inversa. En otras palabras, el varicap actúa igual que una capacidad variable en lo que respecta a una señal alterna. La Figura 5-29c muestra el símbolo esquemático de un varicap. La inclusión de un condensador en serie con el diodo es un recordatorio de que un varicap es un dispositivo que ha sido optimizado para sus propiedades de capacidad variable.

□ La capacidad crece a tensiones inversas elevadas

En la Figura 5-29d se ilustra la variación de la capacidad con la tensión inversa. Esta gráfica muestra que la capacidad se hace menor cuando la tensión inversa se hace mayor. Lo realmente importante aquí es que la tensión inversa controla la capacidad.

¿Cómo se emplea este dispositivo? Puede conectarse un varicap en paralelo con una inductancia para obtener un circuito resonante. Este circuito tiene sólo una frecuencia en la que existe una impedancia máxima. Esta frecuencia se denomina frecuencia resonante. Si se cambia la tensión inversa continua también se cambia la frecuencia resonante. Éste es el principio de la sintonización de una emisora de radio, un canal de televisión, etc.

□ Características de los varicaps

Como la capacidad está controlada por la tensión, los varicaps han sustituido a los condensadores sintonizados mecánicamente en muchas aplicaciones, como en los receptores de televisión y en las radios para automóvil. En las hojas de características para los varicaps se incluye un valor de referencia de capacidad medido a una tensión inversa específica, comúnmente -4 V. Por ejemplo, la hoja de características de un 1N5142 indica una capacidad de referencia de 15 pF a -4 V.

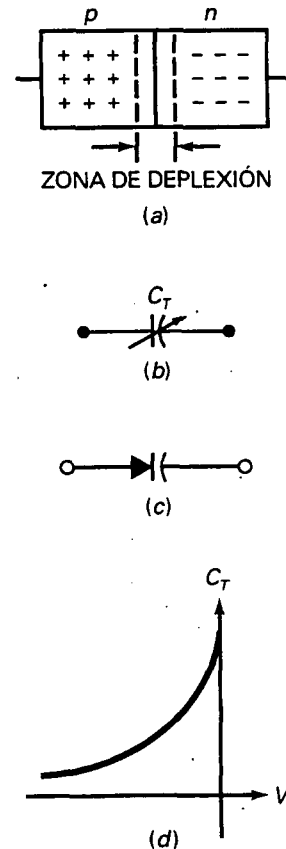


Figura 5-29. Varicap. a) Las zonas dopadas son como placas de condensador separadas por un dieléctrico; b) circuito equivalente de alterna; c) símbolo esquemático; d) curva de capacidad en función de la tensión inversa.

Además del valor de referencia de la capacidad, las hojas de características indican un intervalo de sintonización y un intervalo de tensiones. Por ejemplo, junto con el valor de referencia de 15 pF, la hoja de características de un 1N5142 indica un intervalo de sintonía de 3:1 para un intervalo de tensión de -4 a -60 V. Tal indicación implica que la capacidad disminuye de 15 a 5 pF si la tensión fluctúa entre -4 y -60 V.

El intervalo de sintonía de un varicap depende del nivel de dopaje. Por ejemplo, la Figura 5-30a muestra el perfil de dopaje para un diodo de unión abrupta (el tipo normal de diodos). El perfil muestra que el dopaje es uniforme en ambos lados de la unión. El intervalo de sintonía de un diodo de unión abrupta oscila entre 3:1 y 4:1.

Para obtener intervalos de sintonía más extensos, algunos varicaps tienen una *unión hiperabrupta*, cuyo perfil de dopaje es como el que se ve en la Figura 5-30b. Este perfil indica que la densidad de carga aumenta a medida que nos acercamos a la unión. Esta mayor concentración lleva a una zona de deplexión más estrecha y a una mayor capacidad. Además, los cambios en la tensión inversa tienen efectos más pronunciados sobre la capacidad. Un varicap hiperabrupto tiene un intervalo de sintonía de aproximadamente 10:1, suficiente para sintonizar todo el intervalo de frecuencias de radio AM (de 535 a 1.605 kHz). (Nota: Se necesita un intervalo de 10:1 porque la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la capacidad.)

EJEMPLO 5-17

¿Qué hace el circuito de la Figura 5-31a?

SOLUCIÓN

Como se mencionó en el Capítulo 1, un transistor es un dispositivo semiconductor que actúa como una fuente de corriente. En la Figura 5-31a, el transistor bombea un número fijo de miliamperios en el circuito resonante LC. Una tensión continua negativa polariza en inversa el varicap. Variando esta tensión de control continua podemos variar la frecuencia de resonancia del circuito LC.

Por lo que concierne a la señal de alterna, podemos usar el circuito equivalente mostrado en la Figura 5-31b. El condensador acoplado actúa como un cortocircuito. Una fuente de corriente al-

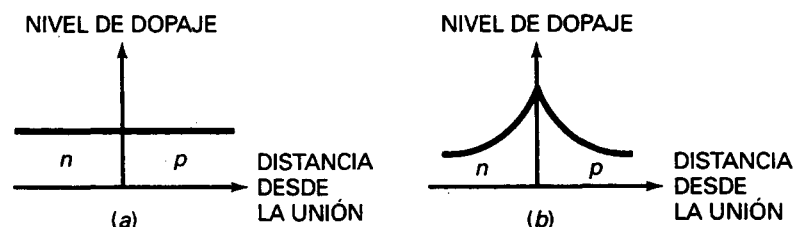


Figura 5-30. Perfiles de dopaje. a) Unión abrupta; b) unión hiperabrupta.

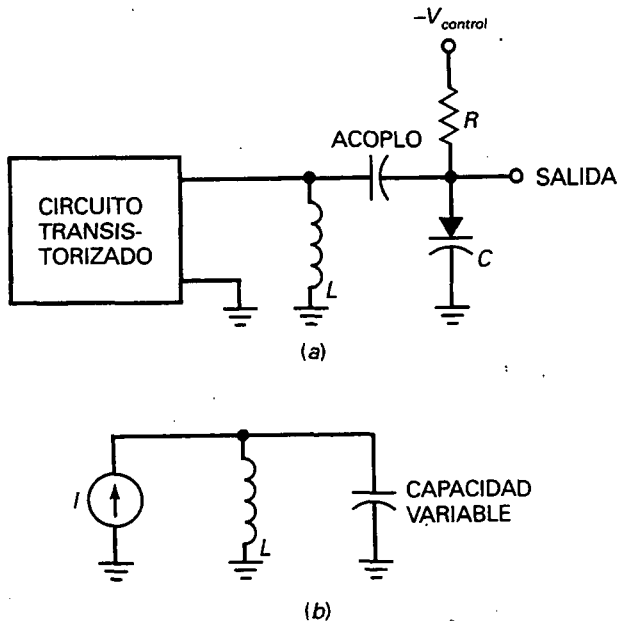


Figura 5-31. Los varicaps pueden sintonizar circuitos resonantes. *a)* Transistor (fuente de corriente) excita el circuito LC sintonizado; *b)* circuito equivalente de alterna.

terna excita el circuito resonante LC . El varicap funciona como un condensador variable, lo que significa que podemos cambiar la frecuencia de resonancia cambiando la tensión de control continua. Esta es la idea básica que sustenta los receptores de radio y televisión.

5-11. OTROS DIODOS

Además de los diodos destinados a aplicaciones especiales estudiados hasta aquí, hay algunos otros acerca de los cuales debe saber más el lector. Teniendo en cuenta que son muy especializados, se dará solamente una breve descripción.

❑ Los varistores

Los relámpagos, los fallos en la red eléctrica, etc., pueden afectar a la tensión de red superponiendo valles, picos y otros transitorios a los 120 V rms normales. Los valles son caídas de tensión bruscas que duran microsegundos o menos. Los picos son sobretensiones de duración muy corta, de hasta 2.000 V o más. En algunos equipos se usan filtros entre la línea y el primario del transformador para eliminar los problemas ocasionados por los transitorios de la línea.

Uno de los dispositivos empleados para el filtrado en la línea es el varistor (también llamado supresor de transitorios). Este dispositivo semiconductor equivale a dos diodos zener opuestos con una gran tensión de ruptura en ambas direcciones. Los varistores se encuentran comercialmente con tensiones de ruptura entre 10 y 1.000 V. Pueden manejar corrientes transitorias de pico de cientos o miles de amperios.

Por ejemplo, el V130LA2 es un varistor con una tensión de ruptura de 184 V (equivalente a 130 V rms) y una limitación de corriente de pico de 400 A. Conectando uno de éstos en el arrollamiento primario, como se muestra en la Figura 5-32a, no habrá por qué preocuparse de los picos. El varistor recortará todos los picos al nivel de los 184 V y protegerá su fuente de alimentación.

□ Diodos de corriente constante

Estos diodos funcionan de forma opuesta a los diodos zener. En vez de mantener constante la tensión, hacen que la corriente sea constante. Conocidos como **diodos de corriente constante** (y también como diodos *reguladores de corriente*), estos dispositivos *mantienen la corriente que circula a través de ellos en un valor fijo*, incluso cuando varíe la tensión aplicada. Por ejemplo, el 1N5305 es un diodo de corriente constante con una corriente típica de 2 mA en un intervalo de tensión de 2 a 100 V. La Figura 5-32b muestra el símbolo esquemático de un diodo regulador de corriente. En la Figura 5-32b, el diodo mantendrá la corriente constante a 2 mA incluso aunque la resistencia de carga se varíe de 1 a 49 k Ω .

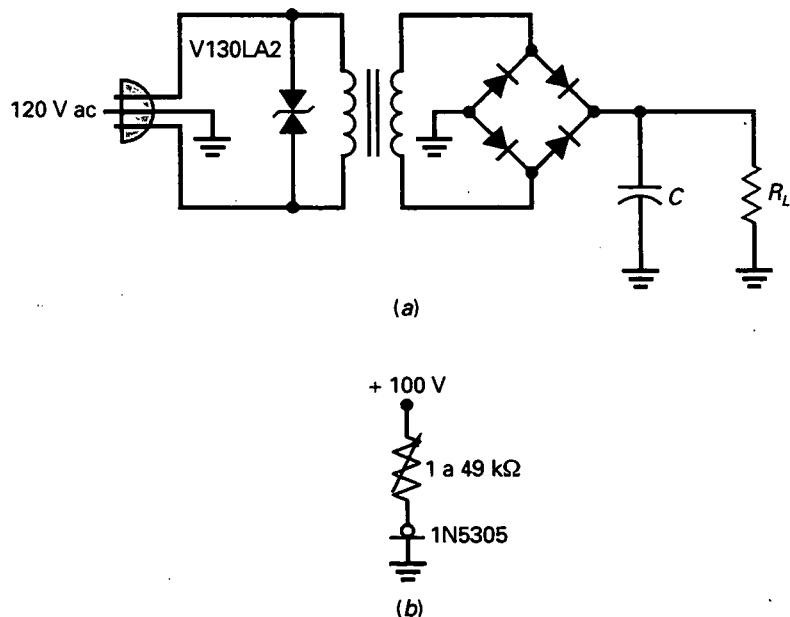


Figura 5-32. a) El varistor protege el primario de los transformadores en la red eléctrica; b) diodo de corriente constante.

□ Diodos de recuperación en escalón

El **diodo de recuperación en escalón** tiene un perfil de dopaje especial mostrado en la Figura 5-33a. Esta figura indica que la densidad de portadores disminuye cerca de la unión. Esta distribución poco común de portadores es el origen de un fenómeno llamado *bloqueo rápido inverso*.

La Figura 5-33b muestra el esquema eléctrico de un diodo de recuperación en escalón. Durante el semiciclo positivo, el diodo conduce igual que un diodo de silicio. Pero durante el semiciclo negativo, la corriente inversa existe sólo durante un tiempo muy corto debido a las cargas almacenadas, reduciéndose repentinamente hasta cero.

La Figura 5-33c muestra la tensión de salida. Refleja cómo el diodo conduce corriente inversa por un momento y de repente se abre de golpe. Ésta es la razón de que el diodo de recuperación en escalón también se conozca como *diodo de bloqueo rápido*. El escalón repentino en la onda de corriente es rico en armónicos y se puede filtrar para producir una onda sinusoidal de frecuencia más alta. (Los armónicos son múltiplos de la frecuencia de entrada como $2f_{in}$, $3f_{in}$ y $4f_{in}$.) Debido a esto, los diodos de recuperación en escalón son útiles en multiplicadores de frecuencia, circuitos cuya frecuencia de salida es un múltiplo de la frecuencia de entrada.

□ Diodos opuestos

Los diodos zener normalmente tienen tensiones de ruptura mayores de 2 V. Incrementando el nivel de dopaje, puede lograrse que el efecto zener se dé próximo a la tensión cero. La conducción en polarización directa todavía tiene lugar aproximadamente a los 0,7 V, pero la conducción inversa (ruptura) comienza más o menos a los -0,1 V.

Un diodo con una curva como la de la Figura 5-34a recibe el nombre de **diodo opuesto** porque conduce mejor en la dirección inversa que en la directa. En la Figura 5-34d se muestra una onda sinusoidal con un pico de 0,5 V excitando un diodo opuesto y una resistencia de carga. (Nótese que el símbolo del zener se usa para el diodo inverso.) Los 0,5 V no son suficientes para activar el diodo en directa, pero sí lo son para llegar a la ruptura en inversa. Por esta razón, la salida es una señal de media onda con un pico de 0,4 V, como se muestra en la Figura 5-34b.

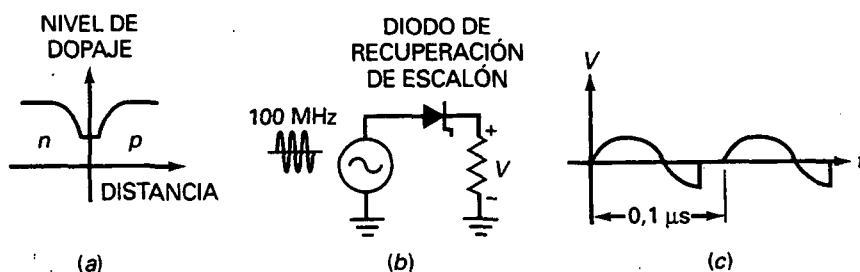


Figura 5-33. Diodo de recuperación en escalón. a) El perfil de dopaje muestra menor dopaje cerca de la unión; b) circuito rectificando una señal alterna de entrada; c) el bloqueo rápido produce una tensión positiva en escalón rica en armónicos.

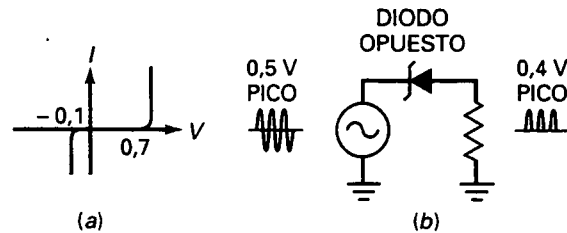


Figura 5-34. Diodo opuesto. a) La ruptura ocurre a $-0,1$ V; b) circuito rectificando una señal alterna débil.

Los diodos opuestos se usan ocasionalmente para rectificar señales débiles con amplitudes de pico entre $0,1$ y $0,7$ V.

□ Diodos túnel

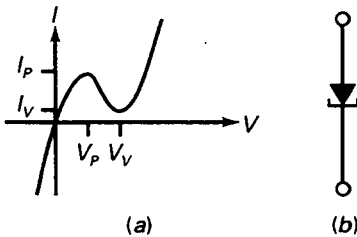


Figura 5-35. Diodo túnel.
a) La ruptura ocurre a 0 V;
b) símbolo esquemático.

Aumentando el nivel de dopaje de un diodo opuesto se puede hacer que la ruptura se produzca a los 0 V. Además, el dopaje más fuerte distorsiona la curva de polarización directa, como se muestra en la Figura 5-35a. Un diodo como éste recibe el nombre de **diodo túnel**.

La Figura 5-35b representa el símbolo esquemático para un diodo túnel. En este tipo de diodos se presenta un fenómeno conocido como *resistencia negativa*. Esto significa que un aumento de la tensión de polarización directa produce una disminución en la corriente directa al menos en la parte de la curva entre V_p y V_v . La resistencia negativa de los diodos túnel es útil en determinados circuitos de alta frecuencia llamados *osciladores*. Estos circuitos pueden generar una señal sinusoidal similar a la producida por un generador de alterna. Pero a diferencia del generador de alterna, que convierte energía mecánica en una señal sinusoidal, un oscilador convierte energía continua en una señal sinusoidal. En capítulos posteriores se explicará cómo construir osciladores.

Tabla 5-3. Resumen de dispositivos

Dispositivo	Idea clave	Aplicación
Diodo zener	Opera en la zona de ruptura	Reguladores de tensión
LED	Emite luz no coherente	Indicadores corriente continua/alterna
Indicador de 7 segmentos	Puede presentar números	Instrumentos de medida
Fotodiodo	La luz produce portadores minoritarios	Detectores de luz
Optoacoplador	Combina LED y fotodiodo	Aisladores de entrada/salida
Diodo láser	Emite luz coherente	Rep. CD, comunicaciones banda ancha
Diodo Schottky	No tiene almacenamiento de cargas	Rectificadores de alta frecuencia (300 MHz)
Varicap	Actúa como un condensador variable	Sintonizadores de TV y radio
Varistor	Ruptura en ambas direcciones	Protectores de picos de red
Diodo regulador de corriente	Mantiene la corriente constante	Reguladores de corriente
Diodo de recuperación en escalón	Se bloquea durante la conducción inversa	Multiplicadores de frecuencia
Diodo opuesto	Conduce mejor en inversa	Rectificador de señales débiles
Diodo túnel	Tiene una zona de resistencia negativa	Osciladores de alta frecuencia

□ Tabla de dispositivos

La Tabla 5-3 (en la página anterior) resume todos los dispositivos de propósito específico de este capítulo. El diodo zener es útil en reguladores de tensión, el LED como indicador de corriente continua o alterna, el indicador de siete segmentos en instrumentos de medida, etc. Debería estudiar la tabla y recordar las ideas que contiene.

RESUMEN

Sección 5-1. El diodo zener

Se trata de un diodo especial adaptado para funcionar en la zona de ruptura. Su uso principal se encuentra en los reguladores de tensión, que son circuitos que mantienen constante la tensión en la carga. De forma ideal, un diodo zener polarizado en inversa es como una batería perfecta. En una segunda aproximación, tiene una resistencia interna que produce otra pequeña tensión adicional.

Sección 5-2. El regulador zener con carga

Cuando un diodo zener está en paralelo con una resistencia de carga, la corriente a través de la resistencia limitadora de corriente es igual a la suma de la corriente zener y la corriente por la carga. El proceso para analizar un regulador zener consiste en hallar la corriente en serie, la corriente por la carga y la corriente zener (en ese orden).

Sección 5-3. Segunda aproximación de un diodo zener

En la segunda aproximación vemos un diodo zener como una batería de V_Z y una resistencia en serie de R_Z . La corriente a través de R_Z produce una tensión adicional a través del diodo, pero esta tensión es normalmente pequeña. Necesita la resistencia zener para calcular la reducción del rizado.

Sección 5-4. Punto límite de funcionamiento del diodo zener

Un regulador zener dejará de regular si el diodo zener sale de la zona de ruptura. Las condiciones para el peor caso ocurren para una tensión de alimentación mínima, máxima resistencia en serie y mínima resistencia de carga. Para que el regulador zener funcione correctamente bajo todas las condiciones de operación, debe haber corriente zener en las condiciones para el peor caso.

Sección 5-5. Cómo leer una hoja de características

Los datos más importantes en las hojas de características para los diodos zener son la tensión zener, la potencia máxima, la limitación de corriente máxima y la tolerancia. Además, los diseñadores también necesitan la resistencia zener, el factor de ajuste y algunos otros parámetros.

Sección 5-6. Detección de averías

La detección de averías es un arte y una ciencia. Por ello, el conocimiento que se puede adquirir de un libro es limitado. El resto tiene que aprenderse de la experiencia directa con circuitos que tengan averías. Como la detección de averías es un arte, a menudo hay que plantearse hipótesis e intuir la solución.

Sección 5-7. Rectas de carga

La intersección de la recta de carga y la curva del diodo zener es el punto Q . Cuando la fuente de tensión cambia, aparece una recta de carga diferente con un punto Q diferente. Aunque los dos puntos Q tienen diferentes corrientes, las tensiones son casi idénticas. Ésta es una demostración visual de un regulador de tensión.

Sección 5-8. Dispositivos optoelectrónicos

El LED se usa extensamente como un indicador en instrumentos, calculadoras y otros equipos electrónicos. Combinando siete LED en un encapsulado, se obtiene un indicador de siete segmentos. Otro dispositivo optoelectrónico importante es el optoacoplador, el cual permite acoplar una señal entre dos circuitos aislados.

Sección 5-9. El diodo Schottky

El tiempo de recuperación inverso es el tiempo que un diodo tarda en cortarse después de que se le cambia repentinamente de polarización directa a inversa. Este tiempo puede ser sólo de unos pocos nanosegundos, pero impone un límite sobre la frecuencia máxima a la que puede trabajar un circuito rectificador. El diodo Schottky es un diodo especial con un tiempo de recuperación inverso casi cero. Por ello, el diodo Schottky

196 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

es útil a frecuencias altas, las cuales requieren tiempos de conmutación muy cortos.

Sección 5-10. El varicap

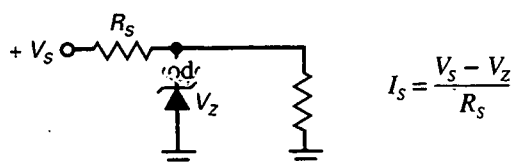
La anchura de la zona de deplexión aumenta con la tensión inversa. Por esta razón, la capacidad de un varicap puede controlarse mediante la tensión inversa. Una aplicación común es la sintonización de aparatos de radio y televisión.

Sección 5-11. Otros diodos

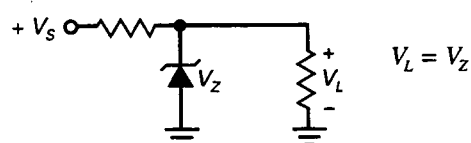
Los varistores son útiles como supresores de transitorios. Los diodos de corriente constante mantienen la corriente, en vez de la tensión, constante. Los diodos de recuperación en escalón se bloquean rápidamente y producen tensiones en escalón que son ricas en armónicos. Los diodos opuestos conducen mejor en la dirección inversa que en la dirección directa. Los diodos túnel tienen resistencia negativa y se pueden usar en osciladores de alta frecuencia.

DERIVACIONES

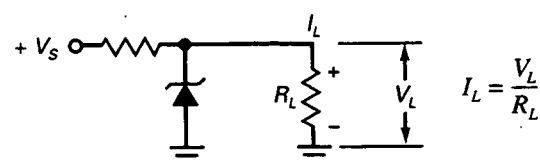
(5-3) Corriente en serie:



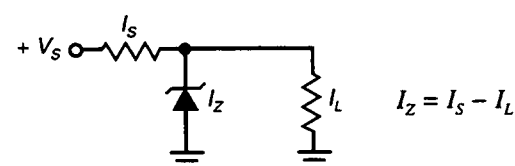
(5-4) Tensión en la carga:



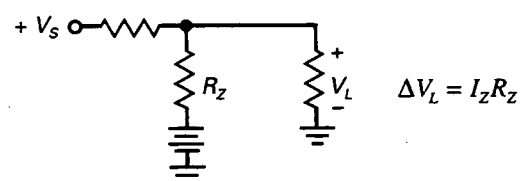
(5-5) Corriente en la carga:



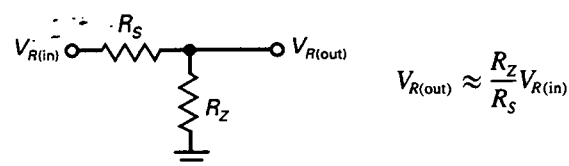
(5-6) Corriente zener:



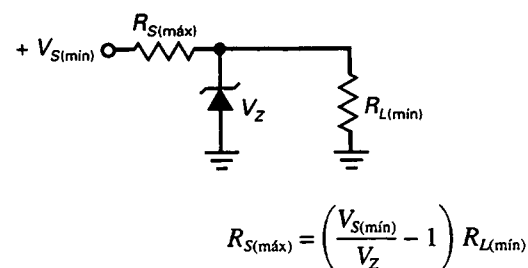
(5-7) Cambio en la corriente por la carga:



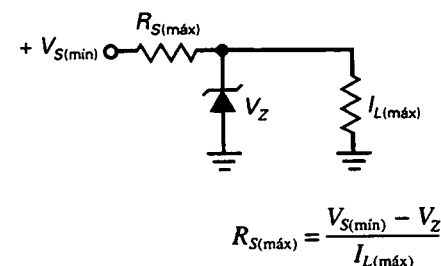
(5-8) Rizado de salida:



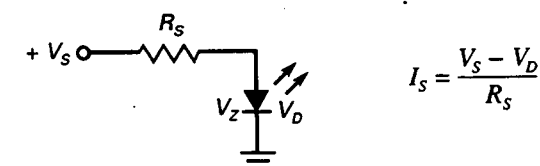
(5-9) Resistencia en serie máxima:



(5-10) Resistencia en serie máxima:



(5-13) Corriente en el LED:



EJERCICIOS PARA EL ALUMNO

CUESTIONES

1. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es cierta con respecto a la tensión de ruptura de un diodo zener?
 - a) Disminuye al aumentar la corriente
 - b) Destruye el diodo
 - c) Es igual a la corriente por la resistencia
 - d) Es aproximadamente constante
2. ¿Cuál de las siguientes es la mejor descripción de un diodo zener?
 - a) Es un diodo rectificador
 - b) Es un dispositivo de tensión constante
 - c) Es un dispositivo de corriente constante
 - d) Funciona en la zona directa
3. Un diodo zener
 - a) Es una batería
 - b) Se comporta como una batería en la zona de ruptura
 - c) Tiene una barrera de potencial de 1 V
 - d) Está polarizado en directo
4. La tensión en la resistencia zener, por lo general, es
 - a) Pequeña
 - b) Grande
 - c) Se mide en voltios
 - d) Se resta de la tensión de ruptura
5. Si la resistencia en serie disminuye en un regulador zener sin carga, la corriente zener
 - a) Disminuye
 - b) Se mantiene constante
 - c) Aumenta
 - d) Es igual a la tensión de la fuente dividida entre la resistencia
6. En la segunda aproximación, la tensión total en el diodo zener es la suma de la tensión de ruptura y la tensión que cae en
 - a) La fuente
 - b) La resistencia en serie
 - c) La resistencia zener
 - d) El diodo zener
7. La tensión en la carga es aproximadamente constante cuando el diodo zener está
 - a) Polarizado en directa
 - b) Polarizado en inversa
 - c) Funcionando en la zona de ruptura
 - d) Sin polarización
8. En un regulador zener con carga, ¿cuál de las siguientes corrientes es más grande?
 - a) La corriente en serie
 - b) La corriente zener
 - c) La corriente por la carga
 - d) Ninguna de las anteriores
9. Si la resistencia de la carga disminuye en un regulador zener, entonces la corriente por el zener
 - a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Es igual a la tensión de la fuente dividida entre la resistencia en serie
10. Si la resistencia de la carga disminuye en un regulador zener, entonces la corriente en serie
 - a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Es igual a la tensión de la fuente dividida entre la resistencia en serie
11. Si la tensión de la fuente aumenta en un regulador zener, ¿cuál de las corrientes indicadas a continuación se mantiene aproximadamente constante?
 - a) La corriente en serie
 - b) La corriente zener
 - c) La corriente por la carga
 - d) La corriente total
12. Si el diodo zener de un regulador zener se conecta con la polaridad equivocada, la tensión en la carga será aproximadamente de

a) 0,7 V	c) 14 V
b) 10 V	d) 18 V
13. Los diodos normales no funcionan adecuadamente a frecuencias altas debido a
 - a) La polarización directa
 - b) La polarización inversa
 - c) La ruptura
 - d) El almacenamiento de carga
14. La capacidad de un varicap aumenta si la tensión inversa que se le aplica
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) Provoca la ruptura
 - d) Provoca el almacenamiento de cargas
15. La ruptura no destruirá un diodo zener suponiendo que la corriente zener sea menor que
 - a) La tensión de ruptura
 - b) La corriente zener de prueba
 - c) La corriente zener máxima
 - d) La barrera de potencial

198 PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

16. Para mostrar el dígito 8 en un indicador de siete segmentos
 - a) Debe activarse la C
 - b) La G debe estar apagada
 - c) Debe activarse la F
 - d) Deben estar activados todos los segmentos
17. Un fotodiodo normalmente
 - a) Tiene polarización directa
 - b) Tiene polarización inversa
 - c) No está polarizado directa ni inversamente
 - d) Emite luz
18. Si la intensidad de la luz aumenta, la corriente inversa de portadores minoritarios en un fotodiodo
 - a) Disminuye
 - b) No se altera
 - c) Aumenta
 - d) Invierte su dirección
19. El dispositivo asociado con la capacidad controlada por tensión es un
 - a) LED
 - b) Varicap
 - c) Fotodiodo
 - d) Diodo zener
20. Si la zona de deplexión se ensancha, la capacidad
 - a) Disminuye
 - b) Aumenta
 - c) No cambia
 - d) Es variable
21. Si la tensión inversa aumenta, la capacidad
 - a) Disminuye
 - b) No cambia
 - c) Aumenta
 - d) Tiene un ancho de banda mayor
22. El varicap está normalmente
 - a) Polarizado en directa
 - b) Polarizado en inversa
 - c) No polarizado
 - d) En la zona de ruptura
23. El dispositivo que se usa para rectificar una señal de alterna débil es un
 - a) Diodo zener
 - b) Diodo emisor de luz
 - c) Varistor
 - d) Diodo opuesto
24. ¿Cuál de los siguientes tiene una zona de resistencia negativa?
 - a) Diodo túnel
 - b) Diodo de recuperación en escalón
 - c) Diodo Schottky
 - d) Optoacoplador
25. Un indicador de fusible fundido usa un
 - a) Diodo opuesto
 - b) Optoacoplador
 - c) Indicador de siete segmentos
 - d) Diodo túnel
26. Para aislar la salida de un circuito de la entrada de otro circuito, ¿qué dispositivo se debe usar?
 - a) Diodo opuesto
 - b) Optoacoplador
 - c) Indicador de siete segmentos
 - d) Diodo túnel
27. El diodo con una caída de tensión directa de aproximadamente 0,25 V es el
 - a) Diodo de recuperación en escalón
 - b) Diodos Schottky
 - c) Diodo opuesto
 - d) Diodo de corriente constante
28. Para operaciones habituales se necesita usar un diodo opuesto con un
 - a) Diodo zener
 - b) Fotodiodo
 - c) Varicap
 - d) Todos los anteriores

PREGUNTAS DE ENTREVISTA DE TRABAJO

1. Dibuje un regulador zener. Después explíqueme cómo funciona y que propósito tiene.
2. Tengo una fuente de alimentación que produce una salida de 25 V dc. Quiero tres salidas reguladas de aproximadamente 15 V, 15,7 V y 16,4 V. Muéstreme un circuito que produzca esas salidas.
3. Tengo un regulador zener que deja de regular durante el día. La tensión alterna de red en mi área varía de 105 a 125 V eficaces. También, la resistencia de carga del regulador zener varía de 100 Ω a 1 k Ω . Dígame algunas de las posibles razones por las que el regulador zener falla durante el día.
4. Esta mañana yo estaba montando un indicador LED. Después de que conecté el LED y encendí la fuente, el LED no se encendió. Comprobé el LED y descubrí que estaba abierto. Probé con otro LED y obtuve el mismo resultado. Dígame algunas de las posibles razones por las que sucedió esto.
5. He oído que un varicap se puede usar para sintonizar un receptor de televisión. Dígame la idea básica de cómo sintoniza un circuito resonante.
6. ¿Por qué se debería usar un optoacoplador en un circuito electrónico?
7. Observando un LED estándar encapsulado en cúpula de plástico, dígame dos formas de identificar el cátodo.
8. Explique las diferencias, si las hay, entre un diodo rectificador y un diodo Schottky.
9. Dibuje un circuito como el de la Figura 5-4a, excepto que debe reemplazar la fuente dc por una fuente ac con valor de pico de 40 V. Dibuje la curva de la tensión de salida para una tensión zener de 10 V.

PROBLEMAS BÁSICOS

Sección 5-1. El diodo zener

- 5-1. Un regulador zener sin carga tiene una tensión de fuente de 20 V, una resistencia en serie de $330\ \Omega$ y una tensión zener de 12 V. ¿Cuál es la corriente zener?
- 5-2. Si la tensión de la fuente en el Problema 5-1 oscila entre 20 y 40 V, ¿cuál es el valor de la corriente zener máxima?
- 5-3. Si la resistencia en serie del Problema 5-1 tiene una tolerancia de ± 10 por 100, ¿cuál es el valor de la corriente zener máxima?

Sección 5-2. El regulador zener con carga

- 5-4. Si el diodo zener de la Figura 5-36 está desconectado, ¿cuál es la tensión en la carga?

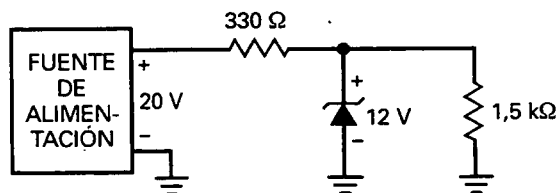


Figura 5-36

- 5-5. Suponga que la tensión de la fuente en la Figura 5-36 disminuye de 20 a 0 V. En algún punto durante el transcurso de esta disminución, el diodo zener dejará de regular. Halle la tensión de la fuente para la cual se pierde la regulación.
- 5-6. Calcule las corrientes por las tres ramas de la Figura 5-36.
- 5-7. Suponiendo que las dos resistencias en la Figura 5-36 tienen una tolerancia de ± 10 por 100, ¿cuál es el valor de la corriente máxima?
- 5-8. Suponiendo que la tensión de la fuente en la Figura 5-36 puede variar de 20 a 40 V, ¿cuál es el valor máximo de la corriente por el zener?
- 5-9. ¿Qué potencia disipan las resistencias y el diodo zener en la Figura 5-36?
- 5-10. El diodo zener de la Figura 5-36 se sustituye por un 1N961. ¿Cuáles son los valores de la tensión en la carga y la corriente por el zener?
- 5-11. Dibuje el circuito de un regulador zener con una tensión de fuente de 25 V, una resistencia en serie de $470\ \Omega$, una tensión zener de 15 V y una resistencia de carga de $1\ k\Omega$. ¿Cuáles son los valores de la tensión en la carga y la corriente por el zener?

Sección 5-3. Segunda aproximación de un diodo zener

- 5-12. El diodo zener en la Figura 5-36 tiene una resistencia zener de $11,5\ \Omega$. Si el rizado de la fuente de alimentación es de 1 V, ¿qué rizado tiene la resistencia de carga?
- 5-13. Durante el día, la tensión alterna de red varía. Esto provoca que la salida no regulada de 20 V de la fuente de alimentación varíe de 17,5 a 21 V. Si la resistencia zener es $11,5\ \Omega$, ¿cuál es la variación de tensión sobre el intervalo anterior?

Sección 5-4. Punto límite de funcionamiento del diodo zener

- 5-14. En la Figura 5-36, la tensión no regulada de la fuente de alimentación puede variar de 18 a 22 V y la resistencia de carga puede variar de $500\ \Omega$ a $1,5\ k\Omega$. ¿Fallará el diodo zener bajo estas condiciones? Si es así, ¿qué valor debería tener la resistencia en serie?
- 5-15. En la Figura 5-36, la tensión no regulada de la fuente de alimentación puede variar de 16 a 23 V y la resistencia en la carga puede variar de 1 a 25 mA. ¿Dejará de regular el diodo zener bajo estas condiciones? Si es así, ¿cuál es el valor máximo para la resistencia en serie?
- 5-16. ¿Cuál es la mínima resistencia de carga que se puede usar en la Figura 5-36 sin perder la regulación zener?

Sección 5-5. Cómo leer una hoja de características

- 5-17. Un diodo zener tiene una tensión de 10 V y una corriente de 20 mA. ¿Cuál es la potencia disipada?
- 5-18. Un 1N968 tiene 5 mA a través de él. ¿Cuál es la potencia?
- 5-19. El diodo zener de la Figura 5-36 es un 1N963B. ¿Cuál es la mínima tensión zener? ¿Y la máxima?
- 5-20. ¿Cuál es la limitación máxima de corriente de un 1N758? Encuentre dos respuestas. Primero, divida la limitación máxima de potencia de 400 mW por la tensión zener. Segundo, tome la media de las dos corrientes máximas que aparecen en la hoja de características.

Sección 5-6. Detección de averías

- 5-21. En la Figura 5-36, ¿cuál es la tensión en la carga para cada una de las condiciones siguientes:
 - a) Diodo zener en cortocircuito
 - b) Diodo zener abierto
 - c) Resistencia en serie abierta
 - d) Resistencia de carga en cortocircuito

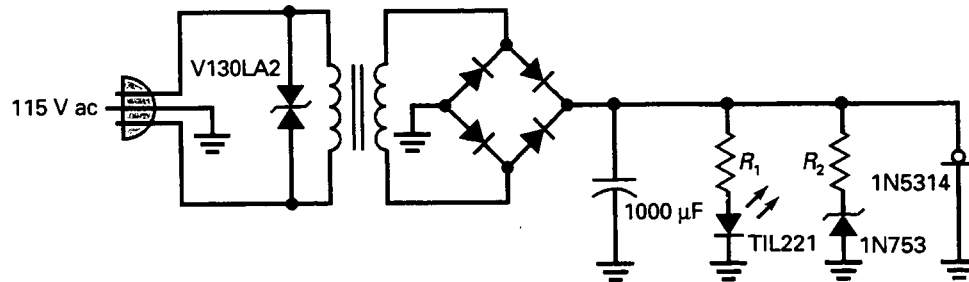


Figura 5-37.

- 5-22. Si se miden aproximadamente 16,4 V para la tensión en la carga en la Figura 5-36, ¿cuál podría ser la avería?
- 5-23. Se miden 20 V en la carga de la Figura 5-36. Un óhmetro indica que el diodo zener está abierto. ¿Qué debería comprobarse antes de sustituir el diodo zener?
- 5-24. En la Figura 5-37, el LED no se enciende. ¿Cuál de los enunciados a continuación es un posible fallo?
- El V130LA2 está abierto
 - La masa conectada entre los dos diodos izquierdos del puente está abierta
 - El condensador del filtro está abierto
 - El condensador del filtro está en cortocircuito
 - El 1N5314 está abierto
 - El 1N5314 está en cortocircuito

Sección 5-8. Dispositivos optoelectrónicos

- 5-25. ¿Cuál es el valor de la corriente por el LED de la Figura 5-38?
- 5-26. Si la tensión de fuente en la Figura 5-38 aumenta a 40 V, ¿qué corriente circulará por el LED?
- 5-27. Si el valor de la resistencia disminuye a 1 k Ω , ¿qué corriente tendrá el LED de la Figura 5-38?
- 5-28. El valor de la resistencia en la Figura 5-38 disminuye hasta que la corriente en el LED es igual a 13 mA. ¿Cuál es el valor de la resistencia?

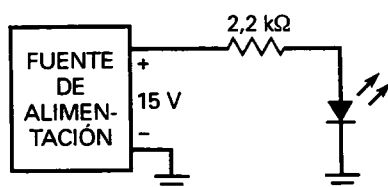


Figura 5-38

PROBLEMAS DE MAYOR DIFICULTAD

- 5-29. El diodo zener de la Figura 5-36 tiene una resistencia zener de 11,5 Ω . ¿Cuál es el valor de la tensión en la carga si se incluye R_Z en los cálculos?
- 5-30. El diodo zener en la Figura 5.36 es un 1N963. Si la resistencia de carga varía de 1 a 10 k Ω , ¿cuál es la tensión mínima en la carga? ¿Y la máxima? (Emplee la segunda aproximación.)
- 5-31. Diseñe un regulador zener que cumpla estas condiciones: tensión en la carga 6,8 V, tensión de fuente de 20 V y corriente por la carga 30 mA.
- 5-32. Un TIL312 es un indicador de siete segmentos. Cada segmento tiene una caída de tensión entre 1,5 y 2 V a 20 mA. La tensión de la fuente es de +5 V. Diseñe un circuito para un display de siete segmentos controlado por conmutadores y cuyo consumo máximo de corriente sea de 140 mA.
- 5-33. La tensión en el secundario en la Figura 5-37 es de 12,6 V eficaces cuando la tensión de red es de 115 V eficaces. Durante el día hay una variación de ± 10 por 100 en la red. Las resistencias tienen tolerancia de ± 5 por 100. El 1N753 tiene una tolerancia de ± 10 por 100 y una resistencia zener de 7 Ω . Si R_2 es igual a 560 Ω , ¿cuál es el máximo valor posible de la corriente zener en cualquier instante durante el día?
- 5-34. En la Figura 5-37, la tensión en el secundario es de 12,6 V eficaces y las caídas de tensión de diodo valen 0,7 V cada una. El 1N5314 es un diodo de corriente constante con una corriente de 4,7 mA. La corriente en el LED es de 15,6 mA y la corriente zener es de 21,7 mA. El condensador del filtro tiene una tolerancia de ± 20 por 100. ¿Cuál es la tensión máxima pico a pico del rizado?

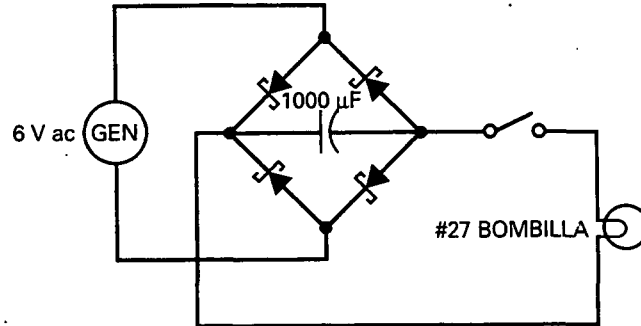


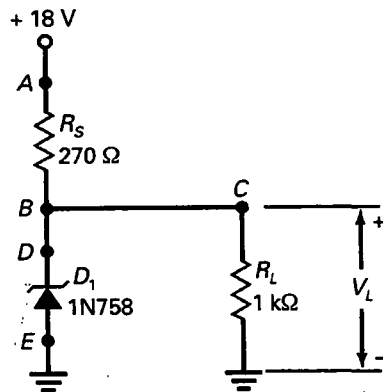
Figura 5-39.

5-35. En la Figura 5-39 se muestra parte de un sistema de iluminación para bicicletas. Los diodos son diodos Schottky. Emplee la segunda aproximación para calcular la tensión en el condensador del filtro.

DETECTOR DE AVERÍAS

5-36. Encuentre los fallos 1 al 4 en la Figura 5-40.

5-37. Encuentre los fallos 5 al 8 en la Figura 5-40.



	1	2	3	4	5	6	7
A	14,2	OK	10,5	0	18	14,2	OK
B	18	0	OK	14,2	0	10,5	18
C	0	18	14,2	∞	10,3	0	14,2
D	18	14,2	OK	18	OK	OK	18
E	OK	18	14,2	0	14,2	10,3	0
F	10,3	0	0	0	18	0	10
G	18	0	10,5	14,2	0	18	OK

MEDIDAS

OK	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
$V_A : C2$	$V_A : D7$	$V_A : A5$	$V_A : D1$	$V_A : E2$	$V_A : B2$	$V_A : B1$	$V_A : B7$	$V_A : G6$
$V_B : F1$	$V_B : F4$	$V_B : B4$	$V_B : A6$	$V_B : D4$	$V_B : C6$	$V_B : A3$	$V_B : C3$	$V_B : A4$
$V_C : C5$	$V_C : C1$	$V_C : E3$	$V_C : G4$	$V_C : F5$	$V_C : B5$	$V_C : B6$	$V_C : C7$	$V_C : F3$
$V_D : E6$	$V_D : F2$	$V_D : F2$	$V_D : D2$	$V_D : G1$	$V_D : F6$	$V_D : G3$	$V_D : E5$	$V_D : G2$
$D_1 : A7$	$D_1 : B3$	$D_1 : A2$	$D_1 : C4$	$D_1 : C4$	$D_1 : G7$	$D_1 : E1$	$D_1 : D6$	$D_1 : E7$

Figura 5-40. Detector de averías.