

## 1.2 MATERIALES SEMICONDUCTORES: Ge, Si Y GaAs

La construcción de cualquier dispositivo electrónico discreto (individual) de estado sólido (estructura de cristal duro) o circuito integrado, se inicia con un material semiconductor de la más alta calidad.

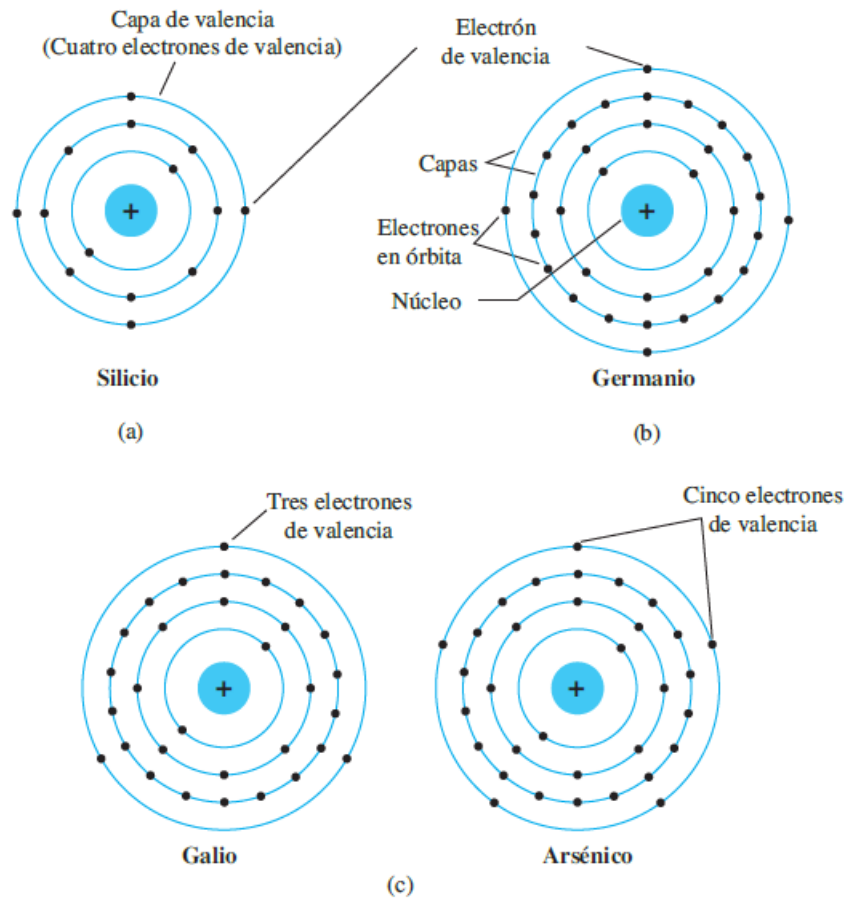
*Los semiconductores son una clase especial de elementos cuya conductividad se encuentra entre la de un buen conductor y la de un aislante.*

En general, los materiales semiconductores caen dentro de una de dos clases: de un *solo cristal* y *compuesto*. Los semiconductores de un solo cristal como el germanio (Ge) y el silicio (Si) tienen una estructura cristalina repetitiva, en tanto que compuestos como el arseniuro de galio (GaAs), el sulfuro de cadmio (CdS), el nitruro de galio (GaN) y el fosfuro de galio y arsénico (GaAsP) se componen de dos o más materiales semiconductores de diferentes estructuras atómicas.

*Los tres semiconductores más frecuentemente utilizados en la construcción de dispositivos electrónicos son Ge, Si y GaAs.*

### 1.3 ENLACE COVALENTE Y MATERIALES INTRÍNSECOS

Para apreciar plenamente por qué Si, Ge y GaAs son los semiconductores mas utilizados por la industria electrónica, hay que entender la estructura atómica de cada uno y cómo están enlazados los átomos entre sí para formar una estructura cristalina. Todo átomo se compone de tres partículas básicas: electrón, protón y neutrón. En la estructura entrelazada, los neutrones y los protones forman el núcleo; los electrones aparecen en órbitas fijas alrededor de éste. El modelo de Bohr de los tres materiales aparece en la figura 1.3.



**FIG. 1.3**

*Estructura atómica del (a) silicio; (b) germanio, y (c) galio y arsénico.*

*El término intrínseco se aplica a cualquier material semiconductor que haya sido cuidadosamente refinado para reducir el número de impurezas a un nivel muy bajo; en esencia, lo más puro posible que se pueda fabricar utilizando tecnología actual.*

Los electrones libres presentes en un material debido a sólo causas externas se conocen como *portadores intrínsecos*. La tabla 1.1 compara el número de portadores intrínsecos por centímetro cúbico de Ge, Si y GaAs. Es interesante señalar que el Ge tiene el mayor número y el GaAs el menor; en realidad, el Ge tiene el doble que el GaAs. El número de portadores en la forma intrínseca es importante, aunque otras características del material son más significativas al determinar su uso en campo. Uno de esos factores es la *movilidad relativa* ( $\mu_n$ ) de los portadores libres en el material, es decir, la capacidad de los electrones libres de moverse por todo el material. La tabla 1.2 revela con claridad que la movilidad de los portadores libres en el GaAs es más de cinco veces la de los portadores libres en el Si; un factor que produce tiempos de respuesta con dispositivos electrónicos de GaAs que puede ser hasta cinco veces las de los mismos dispositivos hechos de Si. Observe también que los portadores libres en el Ge tienen más de dos veces la movilidad de los electrones en el Si, lo cual es un factor que da como resultado el uso continuo de Ge en aplicaciones de frecuencia de radio de alta velocidad.

**TABLA 1.1**  
*Portadores intrínsecos*

Semiconductor	Portadores intrínsecos (por centímetro cúbico)
GaAs	$1.7 \times 10^6$
Si	$1.5 \times 10^{10}$
Ge	$2.5 \times 10^{13}$

**TABLA 1.2**  
*Factor de movilidad relativa  $\mu_n$*

Semiconductor	$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /V·s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

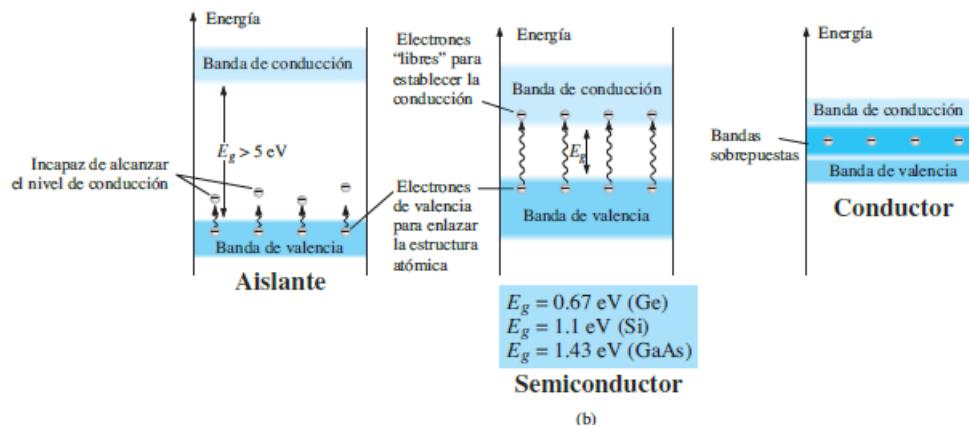
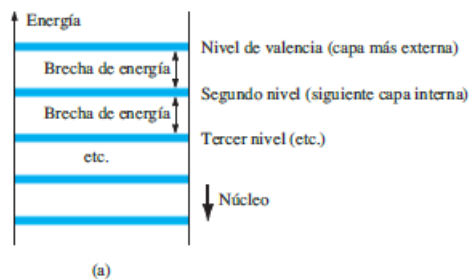
## 1.4 NIVELES DE ENERGÍA

Dentro de la estructura atómica de cada átomo *aislado* hay niveles específicos de energía asociados con cada capa y electrón en órbita, como se muestra en la figura 1.6. Los niveles de energía asociados con cada capa son diferentes según el elemento de que se trate. Sin embargo, en general:

*Cuanto más alejado está un electrón del núcleo, mayor es su estado de energía y cualquier electrón que haya abandonado a su átomo padre tiene un estado de energía mayor que todo electrón que permanezca en la estructura atómica.*

Observe en la figura 1.6a que sólo puede haber niveles de energía específicos para los electrones que permanecen en la estructura atómica de un átomo aislado. El resultado es una serie

www.elsolucionario.net



## 1.5 MATERIALES EXTRÍNSECOS: MATERIALES TIPO *n* Y TIPO *p*

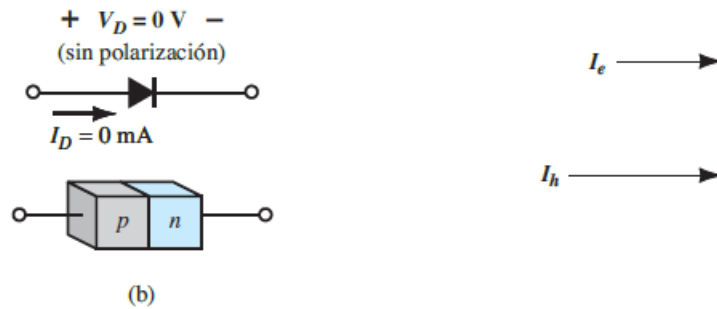
Como el Si es el material más utilizado como material base (sustrato) en la construcción de dispositivos de estado sólido, el análisis en ésta y en las siguientes secciones se ocupa sólo de semiconductores Si. Como el Ge, el Si y el GaAs comparten un enlace covalente similar, se puede ampliar fácilmente el análisis para incluir el uso de otros materiales en el proceso de fabricación.

Como ya antes se indicó, las características de un material semiconductor se pueden modificar de manera significativa con la adición de átomos de impureza específicos al material semiconductor relativamente puro. Estas impurezas, aunque sólo se agregan en 1 parte en 10 millones, pueden alterar la estructura de las bandas lo suficiente para cambiar del todo las propiedades eléctricas del material.

*Un material semiconductor que ha sido sometido al proceso de dopado se conoce como material extrínseco.*

## Material tipo *p*

El material tipo *p* se forma dopando un cristal de germanio o silicio puro con átomos de impureza que tienen *tres* electrones de valencia. Los elementos más utilizados para este propósito son *boro*, *galio* e *indio*. El efecto de uno de estos elementos, el boro, en una base de silicio se indica en la figura 1.9.



**FIG. 1.12**

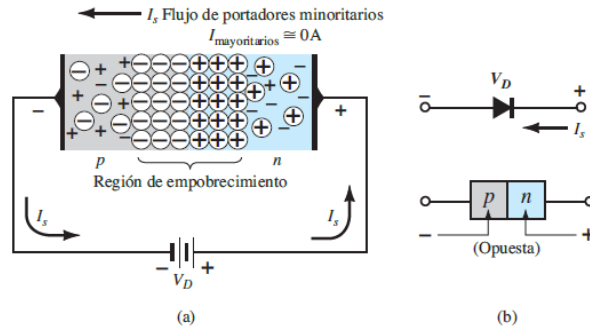
*Una unión tipo p–n con polarización interna: (a) una distribución de diodo, con la polaridad definida y la dirección de la corriente de portadores neto es cero en la terminal externa del dis,*

*Esta región de iones positivos y negativos revelados se llama región de “empobrecimiento”, debido a la disminución de portadores libres en la región.*

La corriente en condiciones de polarización en inversa se llama corriente de saturación en inversa y está representada por  $I_s$ .

www.elsolucionario.net

12 DIODOS  
SEMICONDUCTORES



### Condición de polarización en directa ( $V_D > 0$ V)

La condición de *polarización en directa* o “encendido” se establece aplicando el potencial positivo al material tipo *p* y el potencial negativo al tipo *n* como se muestra en la figura 1.14.

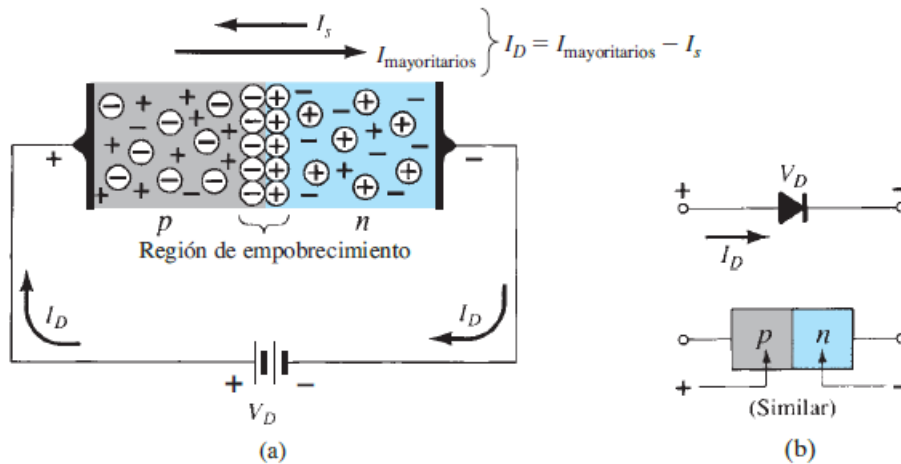


FIG. 1.14

Unión *p-n* polarizada en directa: (a) distribución interna de la carga en condiciones de polarización en directa; (b) polarización directa y dirección de la corriente resultante.

de un diodo semiconductor se pueden definir mediante la siguiente ecuación, conocida como ecuación de Shockley, para las regiones de polarización en directa y en inversa:

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad (\text{A}) \quad (1.1)$$

donde  $I_s$  es la corriente de saturación en inversa  
 $V_D$  es el voltaje de polarización en directa aplicado a través del diodo  
 $n$  es un factor de idealidad, el cual es una función de las condiciones de operación y construcción física; varía entre 1 y 2 según una amplia diversidad de factores.  
 (se supondrá  $n = 1$  en todo este texto a menos que se indique de otra manera).

El voltaje  $V_T$  en la ecuación (1.1) se llama *voltaje térmico* y está determinado por

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{V}) \quad (1.2)$$

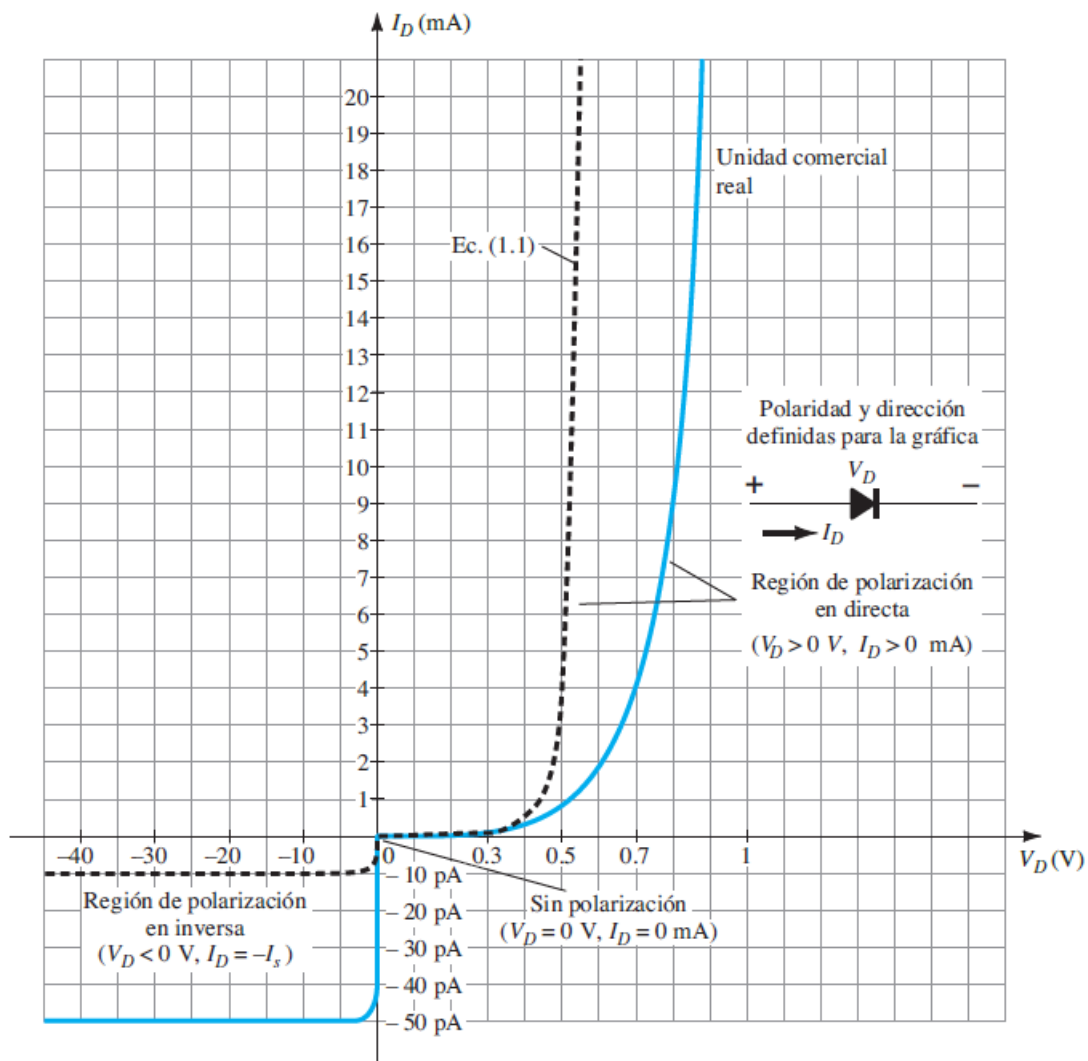
donde  $k$  es la constante de Boltzmann  $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$   
 $T$  es la temperatura absoluta en Kelvin  $= 273 + \text{la temperatura en } ^\circ\text{C}$ .  
 $q$  es la magnitud de la carga del electrón  $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

**EJEMPLO 1.1** A una temperatura de  $27^\circ\text{C}$  (temperatura común para componentes en un sistema de operación cerrado), determine el voltaje térmico  $V_T$ .

**Solución:** Sustituyendo en la ecuación (1.2), obtenemos

$$\begin{aligned} T &= 273 + ^\circ\text{C} = 273 + 27 = 300 \text{ K} \\ V_T &= \frac{kT}{q} = \frac{(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300)}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \\ &= 25.875 \text{ mV} \cong 26 \text{ mV} \end{aligned}$$

El voltaje térmico se convertirá en un parámetro importante en los análisis de este capítulo y varios de los siguientes.

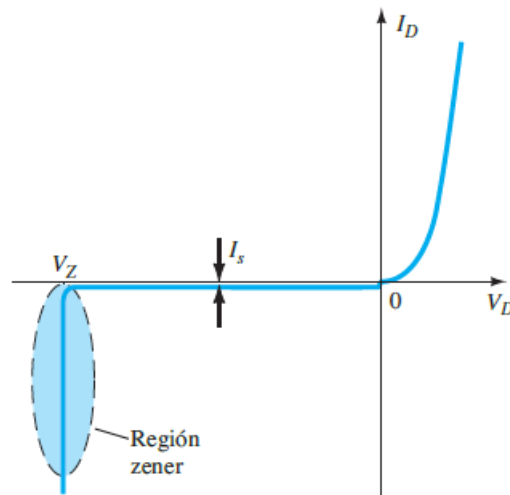


**FIG. 1.15**  
*Características del diodo semiconductor de silicio.*



## Región Zener

Aun cuando la escala de la figura 1.15 está en décimas de volts en la región negativa, hay un punto donde la aplicación de un voltaje demasiado negativo producirá un cambio abrupto de las características, como se muestra en la figura 1.17. La corriente se incrementa muy rápido en una dirección opuesta a la de la región de voltaje positivo. El potencial de polarización en inversa que produce este cambio dramático de las características se llama *potencial Zener* y su símbolo es  $V_Z$ .



**FIG. 1.17**  
Región Zener.

**EJEMPLO 1.2** Cómo utilizar las curvas de la figura 1.18:

- Determine el voltaje a través de cada diodo con una corriente de 1 mA.
- Repita con una corriente de 4 mA.
- Repita con una corriente de 30 mA.
- Determine el valor promedio del voltaje en el diodo para el intervalo de corrientes antes dadas.
- ¿Cómo se comparan los valores promedio con los voltajes de rodilla que aparecen en la tabla 1.3?

**Solución:**

- $V_D(\text{Ge}) = 0.2 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{Si}) = 0.6 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{GaAs}) = 1.1 \text{ V}$
- $V_D(\text{Ge}) = 0.3 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{Si}) = 0.7 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{GaAs}) = 1.2 \text{ V}$
- $V_D(\text{Ge}) = 0.42 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{Si}) = 0.82 \text{ V}$ ,  $V_D(\text{GaAs}) = 1.33 \text{ V}$
- Ge:  $V_{\text{av}} = (0.2 \text{ V} + 0.3 \text{ V} + 0.42 \text{ V})/3 = 0.307 \text{ V}$   
Si:  $V_{\text{av}} = (0.6 \text{ V} + 0.7 \text{ V} + 0.82 \text{ V})/3 = 0.707 \text{ V}$   
GaAs:  $V_{\text{av}} = (1.1 \text{ V} + 1.2 \text{ V} + 1.33 \text{ V})/3 = 1.21 \text{ V}$
- Muy parecidos: Ge: 0.307 V vs. 0.3 V, Si: 0.707 V vs. 0.7 V, GaAs: 1.21 V vs. 1.2 V.

## Resistencia de CD o estática

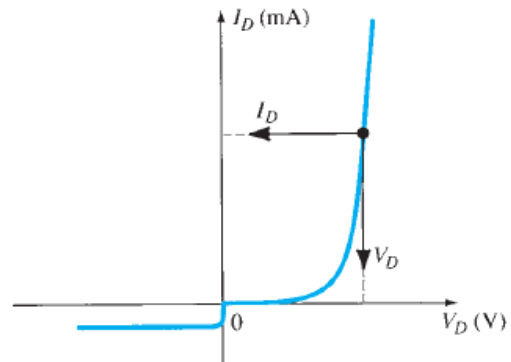
La aplicación de un voltaje de cd a un circuito que contiene un diodo semiconductor produce un punto de operación en la curva de características que no cambia con el tiempo. La resistencia del diodo en el punto de operación se halla determinando los niveles correspondientes de  $V_D$  e  $I_D$  como se muestra en la figura 1.23 y aplicando la siguiente ecuación:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} \quad (1.3)$$

---

[www.elsolucionario.net](http://www.elsolucionario.net)

DIODOS  
SEMICONDUCTORES

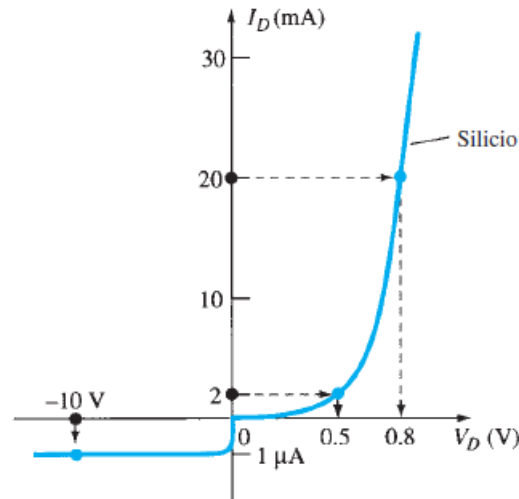


**FIG. 1.23**

*Determinación de la resistencia de cd de un diodo en un punto de operación particular.*

**EJEMPLO 1.3** Determine los niveles de resistencia de cd del diodo de la figura 1.24 con

- $I_D = 2 \text{ mA}$  (bajo nivel)
- $I_D = 20 \text{ mA}$  (alto nivel)
- $V_D = -10 \text{ V}$  (polarizado en inversa)



**FIG. 1.24**

*Ejemplo 1.3.*

**Solución:**

- a. Con  $I_D = 2 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.5 \text{ V}$  (en la curva) y

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 250 \Omega$$

- b. Con  $I_D = 20 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.8 \text{ V}$  (en la curva) y

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 40 \Omega$$

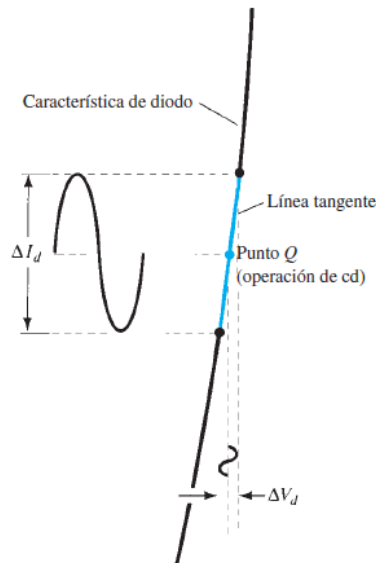
- c. Con  $V_D = -10 \text{ V}$ ,  $I_D = -I_S = -1 \mu\text{A}$  (en la curva) y

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10 \text{ V}}{1 \mu\text{A}} = 10 \text{ M}\Omega$$

lo que confirma con claridad algunos de los comentarios anteriores con respecto a los niveles de resistencia de cd de un diodo.

## Resistencia de CA o dinámica

Es obvio de acuerdo con la ecuación (1.3) y el ejemplo 1.3 que la resistencia de cd de un diodo es independiente de la forma de las características en la región alrededor del punto de interés. Si se aplica una entrada senoidal en lugar de una de cd, la situación cambiará por completo. La entrada variable moverá el punto de operación instantáneo hacia arriba y hacia abajo de una región de las características, y por lo tanto define un cambio específico de la corriente y voltaje como se muestra en la figura 1.25. Sin ninguna señal variable aplicada, el punto de operación sería el punto  $Q$  que aparece en la figura 1.25, determinado por los niveles de cd aplicados. La designación de punto  $Q$  se deriva de la palabra *quiescente*, que significa “fijo o invariable”.



**FIG. 1.25**

*Definición de la resistencia dinámica o resistencia de ca.*

Una línea recta trazada tangente a la curva por el punto  $Q$  como se muestra en la figura 1.26

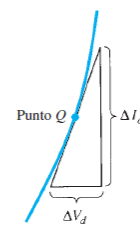
definirá un cambio particular del voltaje y corriente que se puede utilizar para determinar la resistencia de ca o dinámica en esta región de las características del diodo. Se deberá hacer un esfuerzo por mantener el cambio de voltaje y corriente lo más pequeño posible y equidistante a ambos lados del punto  $Q$ . En forma de ecuación,

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \quad (1.4)$$

donde  $\Delta$  indica un cambio finito de la cantidad.

Cuanto más inclinada sea la pendiente, menor será el valor de  $\Delta V_d$  con el mismo cambio de  $\Delta I_d$  y menor es la resistencia. La resistencia de ca en la región de levantamiento vertical de la característica es, por consiguiente, bastante pequeña, en tanto que la resistencia de ca es mucho más alta con niveles de corriente bajos.

*En general, por consiguiente, cuanto más bajo esté el punto de operación (menor corriente o menor voltaje), más alta es la resistencia de ca.*

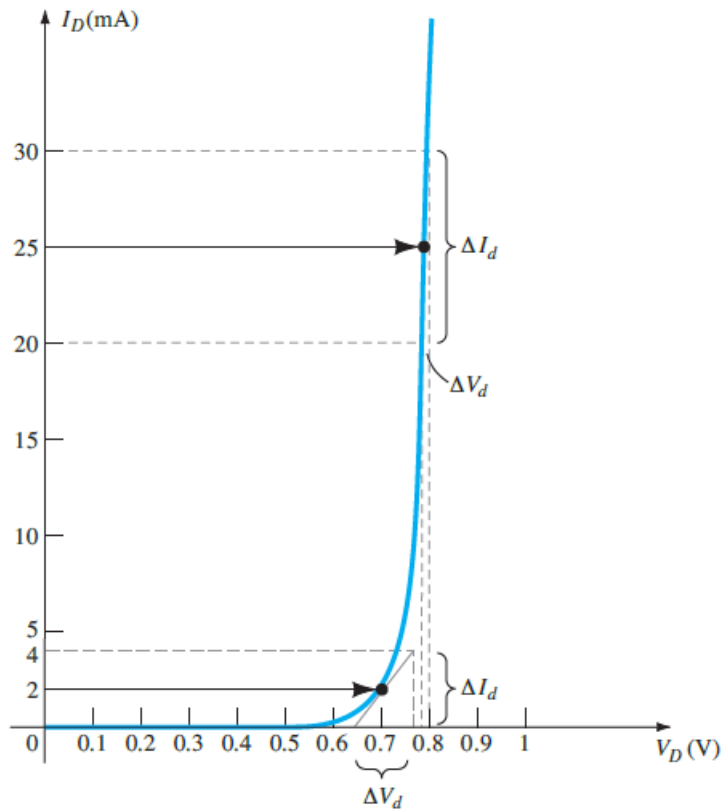


**FIG. 1.26**

*Determinación de la resistencia de ca en un punto  $Q$ .*

**EJEMPLO 1.4** Para las características de la figura 1.27:

- Determine la resistencia de ca con  $I_D = 2$  mA.
- Determine la resistencia de ca con  $I_D = 25$  mA.
- Compare los resultados de las partes (a) y (b) con las resistencias de cd en cada nivel de corriente.



**FIG. 1.27**  
*Ejemplo 1.4.*

- a. Con  $I_D = 2 \text{ mA}$ , la línea tangente en  $I_D = 2 \text{ mA}$  se trazó como se muestra en la figura 1.27 y se eligió una variación de 2 mA por encima y debajo de la corriente de diodo especificada. Con  $I_D = 4 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.76 \text{ V}$  y con  $I_D = 0 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.65 \text{ V}$ . Los cambios resultantes de la corriente y voltaje son, respectivamente,

$$\Delta I_d = 4 \text{ mA} - 0 \text{ mA} = 4 \text{ mA}$$

$$\Delta V_d = 0.76 \text{ V} - 0.65 \text{ V} = 0.11 \text{ V}$$

y la resistencia de ca es

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.11 \text{ V}}{4 \text{ mA}} = 27.5 \Omega$$

- b. Con  $I_D = 25 \text{ mA}$ , la línea tangente en  $I_D = 25 \text{ mA}$  se trazó como se muestra en la figura 1.27 y se eligió una variación de 5 mA por encima y debajo de la corriente de diodo especificada. Con  $I_D = 30 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.8 \text{ V}$  y con  $I_D = 20 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.78 \text{ V}$ . Los cambios resultantes de la corriente y voltaje son, respectivamente,

$$\Delta I_d = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

$$\Delta V_d = 0.8 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 0.02 \text{ V}$$

y la resistencia de ca es

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.02 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

- c. Con  $I_D = 2 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.7 \text{ V}$  y

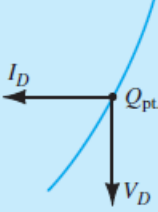
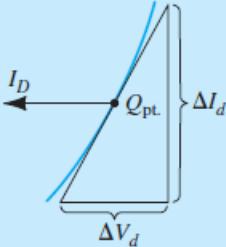
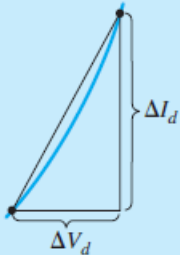
$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 350 \Omega$$

la cual excede por mucho la  $r_d$  de  $27.5 \Omega$ .

Con  $I_D = 25 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.79 \text{ V}$  y

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.79 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 31.62 \Omega$$

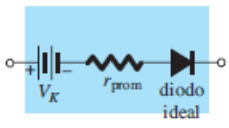
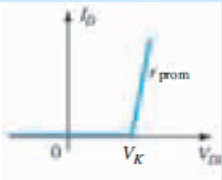
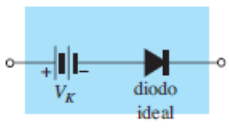
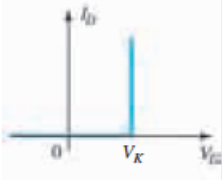

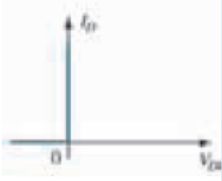
**TABLA 1.5**  
*Niveles de resistencia*

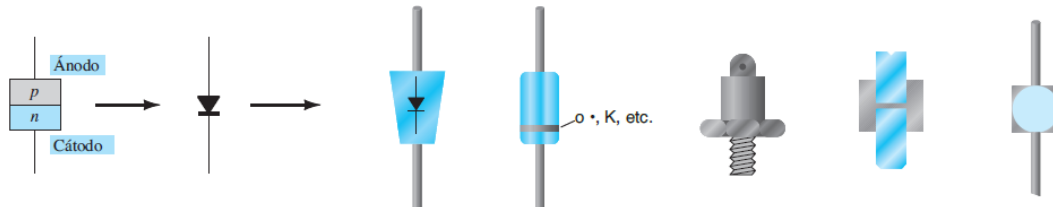
Tipo	Ecuación	Características especiales	Determinación gráfica
CD o estática	$R_D = \frac{V_D}{I_D}$	Definida como un punto en las características	
CA o dinámica	$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$	Definida por una línea tangente en el punto Q	
CA promedio	$r_{\text{prom}} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right _{\text{punto a punto}}$	Definida por una línea recta entre los límites de operación	

## 1.9 CIRCUITOS EQUIVALENTES DEL DIODO

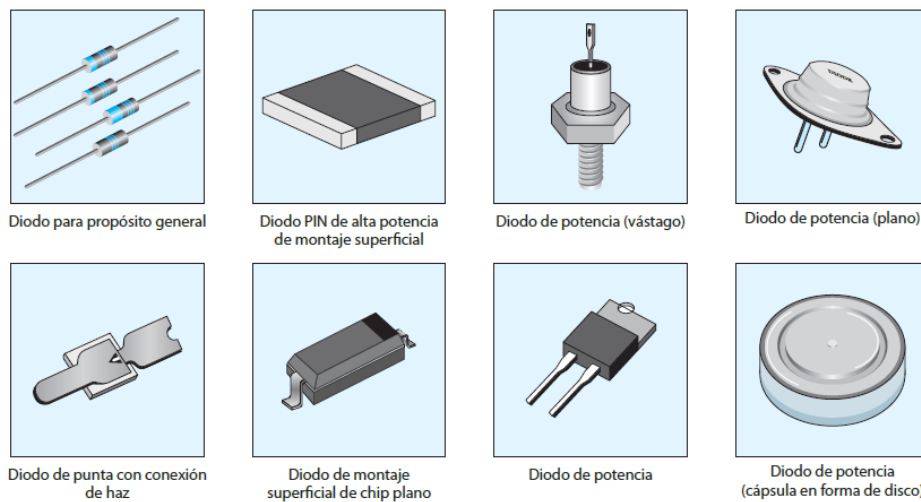
*Un circuito equivalente es una combinación de elementos apropiadamente seleccionados para que representen mejor las características terminales reales de un dispositivo o sistema en una región de operación particular.*

**TABLA 1.6**  
*Circuitos equivalentes (modelos) del diodo*

Tipo	Condiciones	Modelo	Características
Modelo lineal por segmentos			
Modelo simplificado	$R_{red} \gg r_{prom}$		
Dispositivo ideal	$R_{red} \gg r_{prom}$ $E_{red} \gg V_K$		

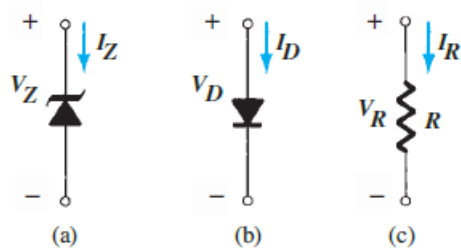


**FIG. 1.38**  
*Notación de diodo semiconductor.*



**FIG. 1.39**  
*Varios tipos de diodos de unión.*





**FIG. 1.46**

*Dirección de conducción: (a) Diodo Zener; (b) diodo semiconductor; (c) elemento resistivo.*

**EJEMPLO 1.5** Analice el diodo Zener de 10 V descrito por la tabla 1.7 si la temperatura se incrementa a 100°C (el punto de ebullición del agua).

**Solución:** Sustituyendo en la ecuación (1.11), obtenemos

$$\begin{aligned}\Delta V_Z &= \frac{T_c V_Z}{100\%} (T_1 - T_0) \\ &= \frac{(0.072\%/^{\circ}\text{C})(10\text{ V})}{100\%} (100^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})\end{aligned}$$

y  $\Delta V_Z = 0.54\text{ V}$

www.elsolucionario.net

El potencial Zener resultante ahora es

$$V_Z' = V_Z + 0.54\text{ V} = \mathbf{10.54\text{ V}}$$

el cual no es un cambio significativo.

DIODOS EMISORES  
DE LUZ

## 1.17 RESUMEN

### Conclusiones y conceptos importantes

1. Las características de un diodo ideal son exactamente las de un **interruptor simple**, excepto por el hecho importante de que un diodo ideal puede **conducir en sólo una dirección**.
2. El diodo ideal es un **corto circuito** en la región de conducción y un **circuito abierto** en la región de no conducción.
3. Un semiconductor es un material que tiene un nivel de conductividad **entre** la de un buen conductor y la de un aislante.
4. Un enlace de átomos, reforzado por la **compartición de electrones** entre átomos vecinos, se llama enlace covalente.
5. El aumento de las temperaturas puede provocar un **incremento significativo** del número de electrones libres en un material semiconductor.
6. La mayoría de los materiales semiconductores utilizados en la industria electrónica tienen **coeficientes de temperatura negativos**; es decir, la resistencia se reduce con un aumento de temperatura.
7. Los materiales intrínsecos son aquellos semiconductores que tienen un **nivel muy bajo de impurezas**, en tanto que los materiales extrínsecos son semiconductores que se **expusieron a un proceso de dopado**.
8. Un material tipo  $n$  se forma agregando átomos **donadores** que tengan **cinco** electrones de valencia para establecer un alto nivel de electrones relativamente libres. En un material tipo  $n$ , el **electrón es el portador mayoritario** y el hueco es el portador minoritario.

9. Un material tipo  $p$  se forma agregando átomos **aceptores** con **tres** electrones de valencia para establecer un alto nivel de huecos en el material. En un material tipo  $n$ , el hueco es el portador mayoritario y el electrón el minoritario.
10. La región cerca de la unión de un diodo que tiene muy pocos portadores se llama región de **empobrecimiento**.
11. Sin **ninguna** polarización externa aplicada, la corriente en el diodo es cero.
12. En la región de polarización en directa, la corriente en el diodo se **incrementa exponencialmente** con el aumento del voltaje a través del diodo.
13. En la región de polarización en inversa, la corriente en el diodo es la **corriente de saturación en inversa muy pequeña** hasta que se alcanza la ruptura Zener y la corriente fluye en la dirección opuesta a través del diodo.
14. La corriente de saturación en inversa  $I_s$  casi **duplica** su magnitud por cada 10 veces de incremento de la temperatura.
15. La resistencia de  $cd$  de un diodo está determinada por la **relación** del voltaje y la corriente en el diodo en el punto de interés y **no es sensible** a la forma de la curva. La resistencia de  $cd$  se **reduce** con el incremento de la corriente o voltaje en el diodo.
16. La resistencia de  $ca$  de un diodo es sensible a la forma de la curva en la región de interés y se reduce con altos niveles de corriente o voltaje del diodo.
17. El voltaje de umbral es aproximadamente de **0.7 V** para diodos de silicio y de **0.3 V** para diodos de germanio.
18. El nivel de disipación de potencia nominal máxima de un diodo es igual al **producto** del voltaje y corriente del diodo.
19. La capacitancia de un diodo se **incrementa exponencialmente** con el aumento del voltaje de polarización en directa. Sus niveles mínimos ocurren en la región de polarización en inversa.
20. La dirección de conducción de un diodo Zener se **opone** a la de la flecha en el símbolo y el voltaje Zener tiene una polaridad opuesta a la de un diodo polarizado en directa.
21. Los diodos emisores de luz (LED) emiten luz en **condiciones de polarización en directa** pero requieren 2 V a 4 V para una buena emisión.

## Ecuaciones

$$I_D = I_s(e^{V_D/nV_T} - 1) \quad V_T = \frac{kT}{q} \quad T_K = T_C + 273^\circ \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$V_K \cong 0.7 \text{ V (Si)}$$

$$V_K \cong 1.2 \text{ V (GaAs)}$$

$$V_K \cong 0.3 \text{ V (Ge)}$$

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

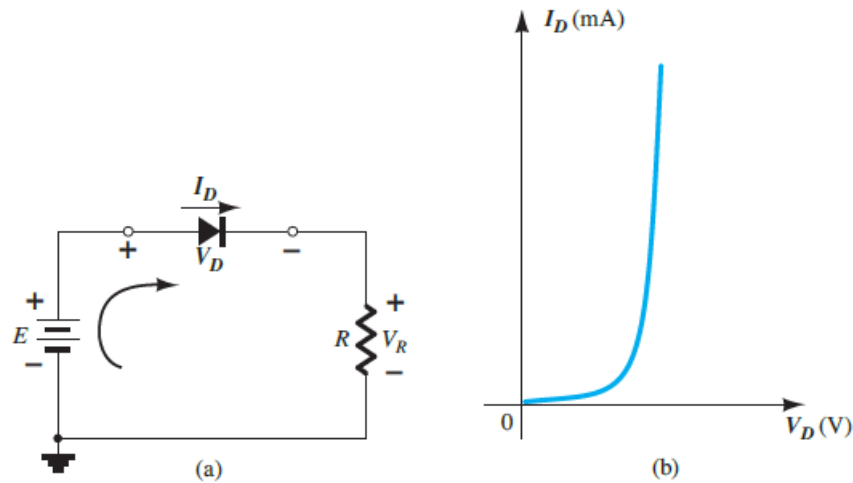
$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

$$r_{\text{prom}} = \left. \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \right|_{\text{punto a punto}}$$

$$P_{D_{\text{máx}}} = V_D I_D$$

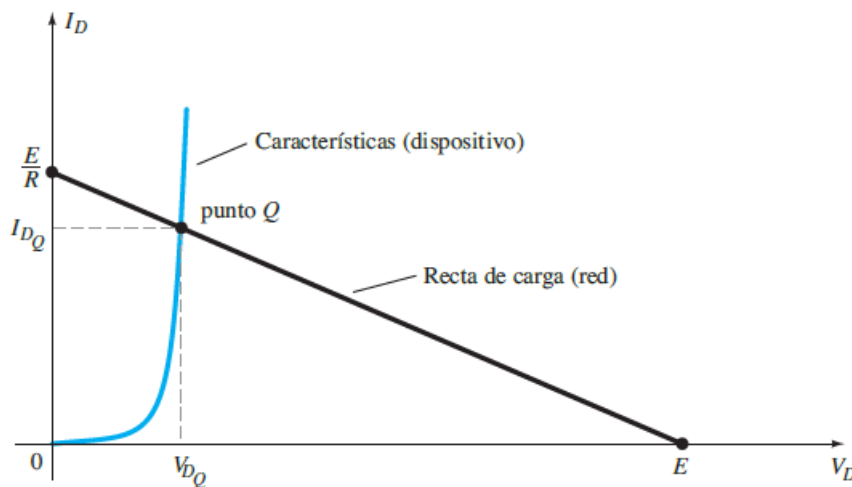
## 2.2 ANÁLISIS POR MEDIO DE LA RECTA DE CARGA

El circuito de la figura 2.1 es la más sencilla de las configuraciones de diodo, y servirá para describir el análisis de un circuito con un diodo empleando sus características reales. En la siguiente sección reemplazaremos las características por un modelo aproximado del diodo y compararemos las soluciones; la del circuito de la figura 2.1 se reduce a determinar los niveles de corriente y voltaje que satisfagan, al mismo tiempo, tanto las características del diodo como los parámetros seleccionados de la red.



**FIG. 2.1**

Configuración del diodo en serie: (a) circuito; (b) características.



**FIG. 2.2**

Trazo de la recta de carga y determinación del punto de operación.

Las intersecciones de la recta de carga con las características de la figura 2.2 se determinan aplicando primero la ley de voltajes de Kirchhoff en el sentido de las manecillas del reloj, lo que da por resultado

$$+E - V_D - V_R = 0$$

o

$$\boxed{E = V_D + I_D R} \quad (2.1)$$

Las dos variables de la ecuación (2.1),  $V_D$  e  $I_D$  son las mismas que las del diodo que aparecen en los ejes de la figura 2.2. Esta semejanza permite graficar la ecuación (2.1) en las mismas características de la figura 2.2.

Las intersecciones de la recta de carga con las características se determinan fácilmente sabiendo que en cualquier parte del eje horizontal  $I_D = 0$  A, y que en cualquier parte del eje vertical  $V_D = 0$  V.

Si *establecemos* que  $V_D = 0$  V en la ecuación (2.1) y resolvemos para  $I_D$ , obtenemos la magnitud de  $I_D$  en el eje vertical. Por consiguiente, con  $V_D = 0$  V, la ecuación (2.1) se vuelve

$$\begin{aligned} E &= V_D + I_D R \\ &= 0 \text{ V} + I_D R \end{aligned}$$

y

$$\boxed{I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0 \text{ V}}} \quad (2.2)$$

como se muestra en la figura 2.2. Si *establecemos* que  $I_D = 0$  en la ecuación (2.1) y resolvemos para  $V_D$ , obtenemos la magnitud de  $V_D$  en el eje horizontal. Por consiguiente, con  $I_D = 0$ , la ecuación (2.1) se vuelve

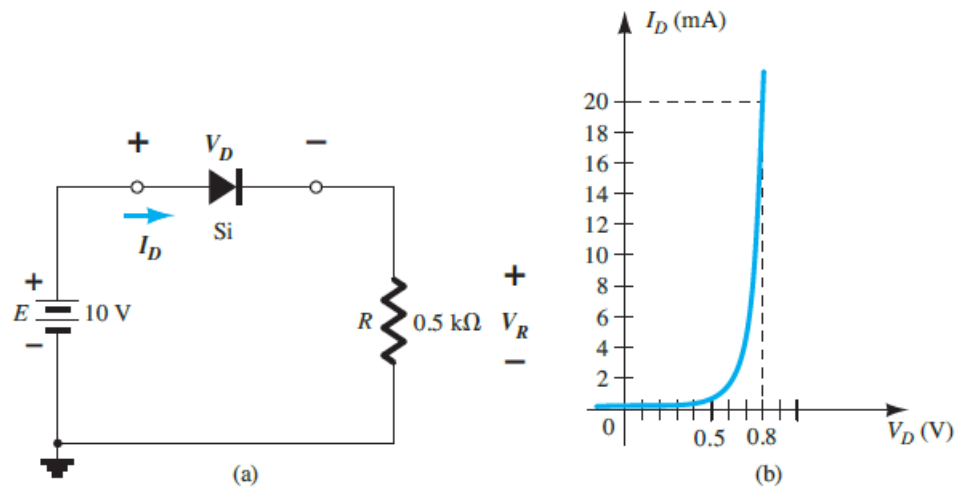
$$\begin{aligned} E &= V_D + I_D R \\ &= V_D + (0 \text{ A})R \end{aligned}$$

y

$$\boxed{V_D = E \Big|_{I_D=0 \text{ A}}} \quad (2.3)$$

**EJEMPLO 2.1** Para la configuración del diodo en serie de la figura 2.3a, que emplea las características de la figura 2.3b, determine:

- $V_{D_Q}$  y  $I_{D_Q}$ .
- $V_R$ .



**FIG. 2.3**

(a) Circuito; (b) características.

**Solución:**

a. Ecuación (2.2):  $I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0\text{ V}} = \frac{10\text{ V}}{0.5\text{ k}\Omega} = 20\text{ mA}$

Ecuación (2.3):  $V_D = E \Big|_{I_D=0\text{ A}} = 10\text{ V}$

La recta de carga resultante aparece en la figura 2.4. La intersección entre la recta de carga y la curva de las características define el punto  $Q$  como

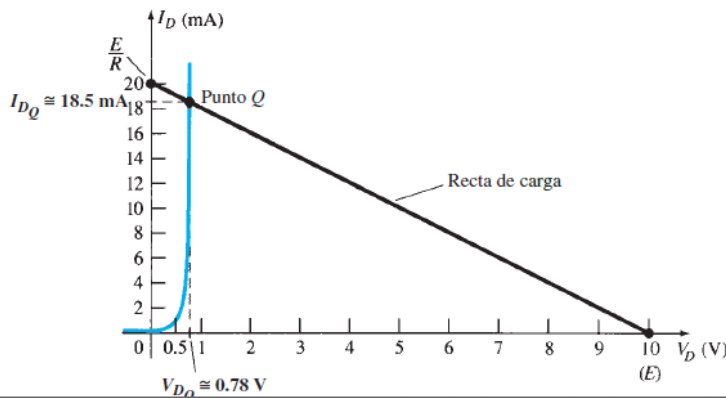
$$V_{D_Q} \cong 0.78\text{ V}$$

$$I_{D_Q} \cong 18.5\text{ mA}$$

El nivel de  $V_D$  es ciertamente una estimación y la escala seleccionada limita la precisión de  $I_D$ . Un mayor grado de precisión requeriría una gráfica mucho más grande y tal vez compleja de manejar.

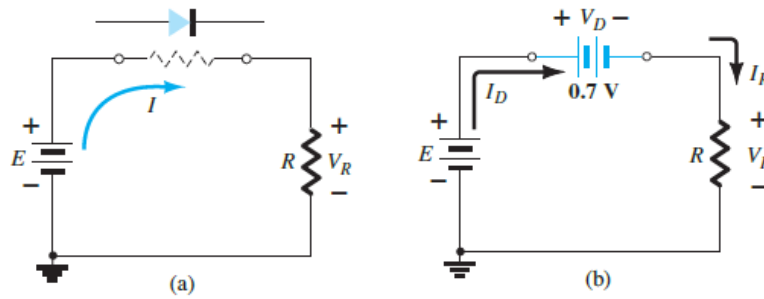
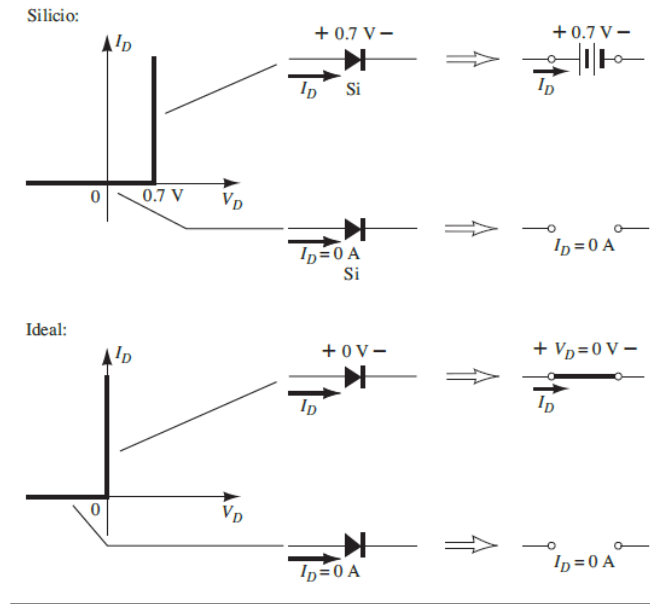
b.  $V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (18.5\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = 18.5\text{ V}$

[www.elsolucionario.net](http://www.elsolucionario.net)



ANÁLISIS POR MEDIO  
DE LA RECTA DE CARGA

**TABLA 2.1**  
Modelos aproximado e ideal del diodo semiconductor



**FIG. 2.9**

(a) Determinación del estado del diodo de la figura 2.8; (b) sustitución del modelo equivalente por el diodo “encendido” de la figura 2.9a.

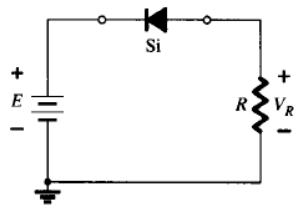
ras referencias, que la polaridad resultante de  $V_D$  es la misma que si el diodo fuera un elemento resistivo. Los niveles de voltaje y corriente resultantes son éstos:

$$V_D = V_K \quad (2.4)$$

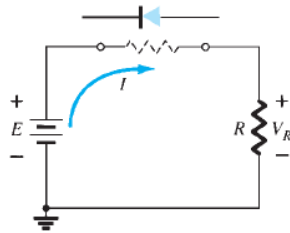
$$V_R = E - V_K \quad (2.5)$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} \quad (2.6)$$

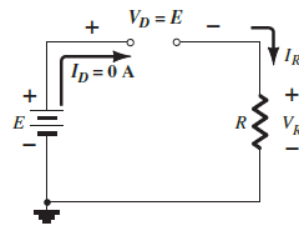




**FIG. 2.10**  
Inversión del diodo de la figura 2.8.



**FIG. 2.11**  
Determinación del estado del diodo de la figura 2.10.



**FIG. 2.12**  
Sustitución del modelo equivalente por el diodo "apagado" de la figura 2.10.

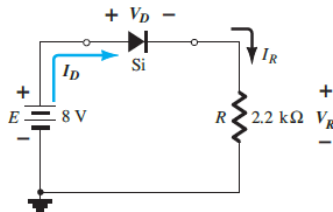
**EJEMPLO 2.4** Para la configuración de diodos en serie de la figura 2.13, determine  $V_D$ ,  $V_R$ , e  $I_D$ .

**Solución:** Como el voltaje aplicado establece una corriente en el sentido de las manecillas del reloj para que coincida con la flecha del símbolo y el diodo esté "encendido",

$$V_D = 0.7 \text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 8 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 7.3 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7.3 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} \cong 3.32 \text{ mA}$$



**FIG. 2.13**  
Circuito del ejemplo 2.4.

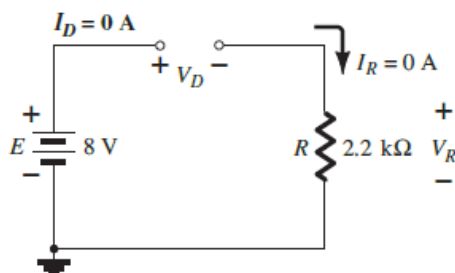
**EJEMPLO 2.5** Repita el ejemplo 2.4 con la corriente invertida (sentido contrario).

**Solución:** Si eliminamos el diodo vemos que la dirección de  $I$  es opuesta a la flecha del símbolo del diodo y el equivalente de éste es el circuito abierto, sin tener en cuenta el modelo que se emplee. El resultado es la red de la figura 2.14, donde  $I_D = 0 \text{ A}$  debido al circuito abierto. Como  $V_R = I_R R$ , tenemos  $V_R = (0)R = 0 \text{ V}$ . Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff alrededor de la malla,

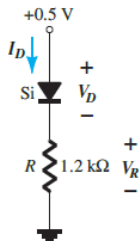
$$E - V_D - V_R = 0$$

y

$$V_D = E - V_R = E - 0 = E = 8 \text{ V}$$



**FIG. 2.14**  
Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 2.5



**FIG. 2.16**  
Circuito del diodo en serie  
del ejemplo 2.6.

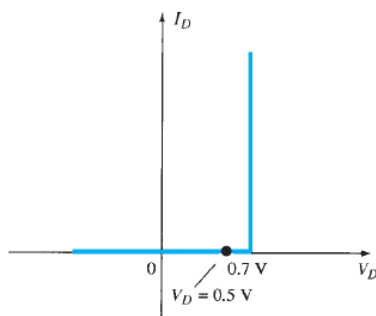
**EJEMPLO 2.6** Para la configuración de diodos en serie de la figura 2.16, determine  $V_D$ ,  $V_R$  e  $I_D$ .

**Solución:** Aun cuando la “presión” establece una corriente con la misma dirección de la flecha del símbolo, el nivel del voltaje aplicado es insuficiente para “encender” el diodo. El punto de operación en la curva de características se muestra en la figura 2.17 y establece al circuito abierto equivalente como aproximación apropiada, como se muestra en la figura 2.18. En consecuencia, los niveles de corriente y voltaje resultantes son los siguientes:

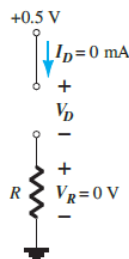
$$I_D = 0 \text{ A}$$

$$V_R = I_R R = I_D R = (0 \text{ A}) 1.2 \text{ k}\Omega = 0 \text{ V}$$

$$V_D = E = 0.5 \text{ V}$$



**FIG. 2.17**  
Punto de operación con  $E = 0.5 \text{ V}$ .



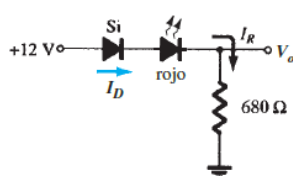
**FIG. 2.18**  
Determinación de  $I_D$ ,  $V_R$  y  $V_o$   
para el circuito de la figura 2.16.

**EJEMPLO 2.7** Determine  $V_o$  e  $I_D$  para el circuito en serie de la figura 2.19.

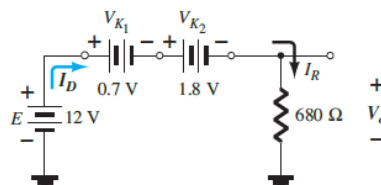
**Solución:** Una forma igual de abordar el ejemplo 2.4 revelará que la dirección de la corriente resultante coincide con la de las flechas de los símbolos de ambos diodos y se obtiene la red de la figura 2.20 porque  $E = 12 \text{ V} > (0.7 \text{ V} + 1.8 \text{ V [tabla 1.8]}) = 2.5 \text{ V}$ . Observe la fuente de 12 V vuelta a trazar y la polaridad de  $V_o$  a través del resistor de  $680 \Omega$ . El voltaje resultante es

$$V_o = E - V_{K_1} - V_{K_2} = 12 \text{ V} - 2.5 \text{ V} = 9.5 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R} = \frac{9.5 \text{ V}}{680 \Omega} = 13.97 \text{ mA}$$

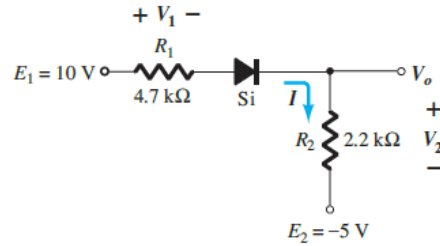


**FIG. 2.19**  
Circuito del ejemplo 2.7



**FIG. 2.20**  
Determinación de las cantidades  
desconocidas del ejemplo 2.7.

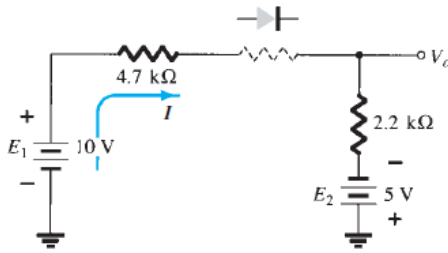
**EJEMPLO 2.9** Determine  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_o$  para la configuración en serie cd de la figura 2.25.



**FIG. 2.25**

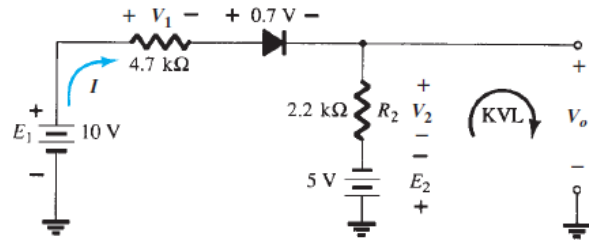
*Circuito del ejemplo 2.9.*

**Solución:** Se trazan las fuentes y se indica la dirección de la corriente como se muestra en la figura 2.26. El diodo está “encendido” y se incluye la notación que aparece en la figura 2.27 para indicar este estado. Observe que el estado “encendido” se indica con el  $V_D = 0.7$  V adicional en la figura. Esto elimina la necesidad de volver a dibujar la red y evita cualquier confusión que pudiera presentarse con la aparición de otra fuente. Como se indicó en la introducción a esta



**FIG. 2.26**

*Determinación del estado del diodo de la red de la figura 2.25.*



**FIG. 2.27**

*Determinación de las cantidades desconocidas de la red de la figura 2.25: KVL, ley de voltajes de Kirchhoff.*

sección, probablemente éstas sean la ruta y notación que se seguirán cuando se establezca un nivel de confianza en el análisis de configuraciones del diodo. Con el tiempo todo el análisis se realizará recurriendo simplemente a la red original. Recuerde que un diodo polarizado en inversa puede indicarse con una línea que cruce el dispositivo.

La corriente resultante a través del circuito es

$$I = \frac{E_1 + E_2 - V_D}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V} + 5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{4.7 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega} = \frac{14.3 \text{ V}}{6.9 \text{ k}\Omega} \\ \cong 2.07 \text{ mA}$$

y los voltajes son

$$V_1 = IR_1 = (2.07 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega) = 9.73 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2.07 \text{ mA})(2.2 \text{ k}\Omega) = 4.55 \text{ V}$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff a la sección de salida en el sentido de las manecillas del reloj se obtiene

$$-E_2 + V_2 - V_o = 0$$

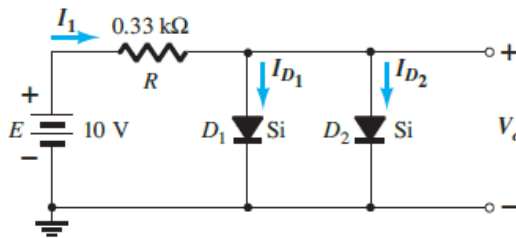
y 
$$V_o = V_2 - E_2 = 4.55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0.45 \text{ V}$$

El signo menos indica que la polaridad de  $V_o$  es la opuesta a la que aparece en la figura 2.25.

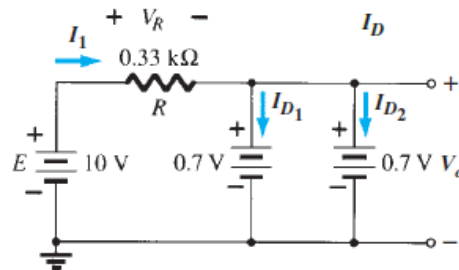
## 2.4 CONFIGURACIONES EN PARALELO Y EN SERIE-PARALELO

Los métodos aplicados en la sección 2.3 se pueden extender al análisis de configuraciones en paralelo y en serie-paralelo. Para cada área de aplicación, simplemente siga la misma secuencia de pasos aplicados a configuraciones de diodos en serie.

**EJEMPLO 2.10** Determine  $V_o$ ,  $I_1$ ,  $I_{D1}$  e  $I_{D2}$  para la configuración de diodos en paralelo de la figura 2.28.



**FIG. 2.28**  
*Red del ejemplo 2.10.*



**FIG. 2.29**  
*Determinación de las cantidades desconocidas de la red del ejemplo 2.10.*

**Solución:** Para el voltaje aplicado la “presión” de la fuente actúa para establecer una corriente a través de cada diodo en la misma dirección que se indica en la figura 2.29. Como la dirección de la corriente resultante coincide con la de la flecha del símbolo de cada diodo y el voltaje aplicado es mayor que 0.7 V, ambos diodos están “encendidos”. El voltaje a través de los elementos en paralelo siempre es el mismo y

$$V_o = 0.7 \text{ V}$$

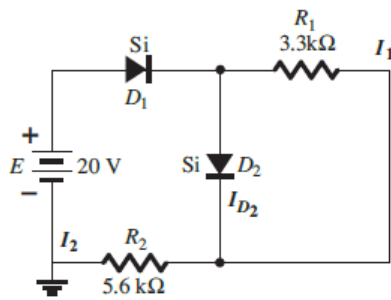
La corriente es

$$I_1 = \frac{V_R}{R} = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{0.33 \text{ k}\Omega} = 28.18 \text{ mA}$$

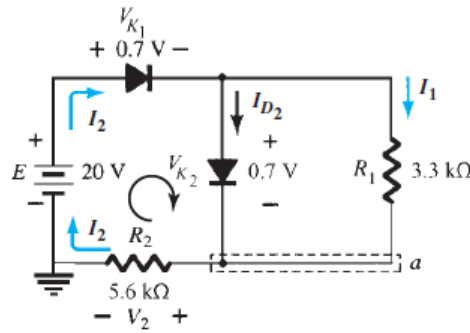
Considerando diodos de características similares, tenemos

$$I_{D_1} = I_{D_2} = \frac{I_1}{2} = \frac{28.18 \text{ mA}}{2} = 14.09 \text{ mA}$$

**EJEMPLO 2.13** Determine las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_{D_2}$  para la red de la figura 2.37.



**FIG. 2.37**  
Red del ejemplo 2.13.



**FIG. 2.38**  
Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 2.13.

**Solución:** El voltaje aplicado (presión) es tal que enciende ambos diodos, como lo indican las direcciones de las corrientes resultantes en la red de la figura 2.38. Observe el uso de la notación abreviada para diodos “encendidos” y que la solución se obtiene mediante la aplicación de técnicas aplicadas a redes de cd en serie-paralelo. Tenemos

$$I_1 = \frac{V_{K_2}}{R_1} = \frac{0.7 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega} = \mathbf{0.212 \text{ mA}}$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff alrededor del lazo indicado en el sentido de las manecillas del reloj, se tiene

$$-V_2 + E - V_{K_1} - V_{K_2} = 0$$

$$\text{y} \quad V_2 = E - V_{K_1} - V_{K_2} = 20 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = \mathbf{18.6 \text{ V}}$$

$$\text{con} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{18.6 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega} = \mathbf{3.32 \text{ mA}}$$

En el nodo inferior  $a$ ,

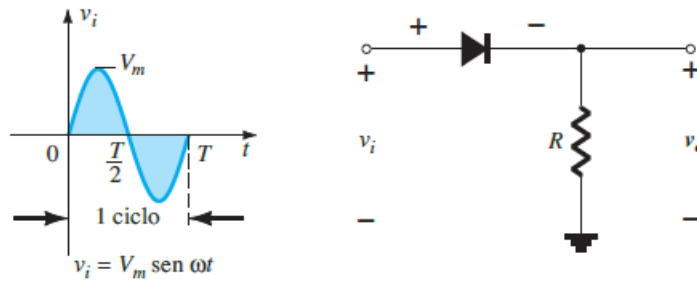
$$I_{D_2} + I_1 = I_2$$

$$\text{y} \quad I_{D_2} = I_2 - I_1 = 3.32 \text{ mA} - 0.212 \text{ mA} \approx \mathbf{3.11 \text{ mA}}$$

## 2.6 ENTRADAS SENOIDALES; RECTIFICACIÓN DE MEDIA ONDA

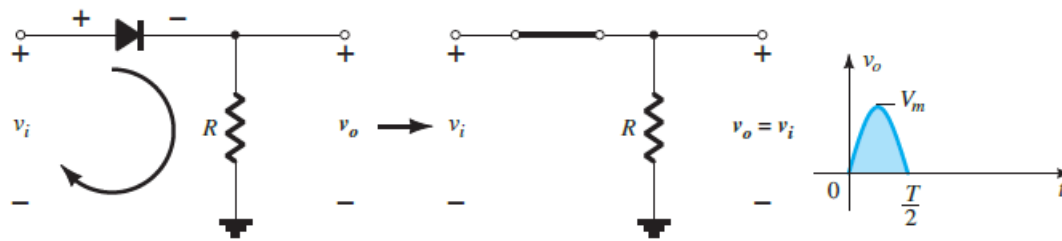
Ahora ampliaremos el análisis de diodos para incluir funciones que varían con el tiempo, como la forma de onda senoidal y la onda cuadrada. Sin duda, el grado de dificultad se incrementará, pero una vez que se entiendan algunas maniobras fundamentales, el análisis será directo y seguirá una ilación común.

Las más sencillas de las redes que se van a examinar con una señal que varía con el tiempo, aparecen en la figura 2.44. Por el momento utilizaremos el modelo ideal (note la ausencia de la etiqueta Si, Ge o GaAs) para que el método no se empañe por la complejidad matemática adicional.



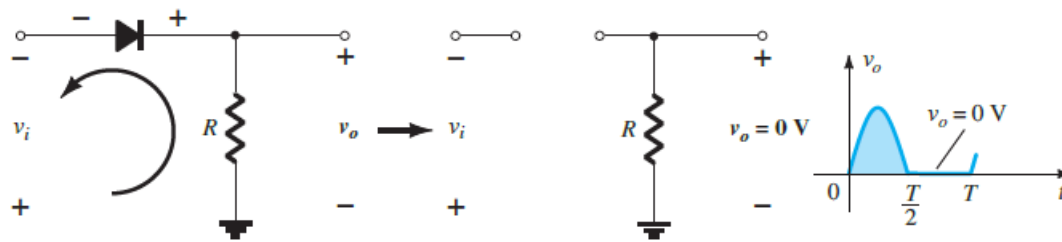
**FIG. 2.44**  
*Rectificador de media onda.*

A lo largo de un ciclo completo, definido por el periodo  $T$  de la figura 2.44, el valor promedio (la suma algebraica de las áreas arriba y debajo del eje) es cero. El circuito de la figura 2.44, llamado *rectificador de media onda*, generará una forma de onda  $v_o$  que tendrá un valor promedio de uso particular en el proceso de conversión ca a cd. Cuando se emplea en el proceso de rectificación, un diodo en general se conoce como *rectificador*. En general, sus capacidades de potencia y corriente son mucho más altas que las de los diodos empleados en otras aplicaciones, como computadoras y sistemas de comunicación.



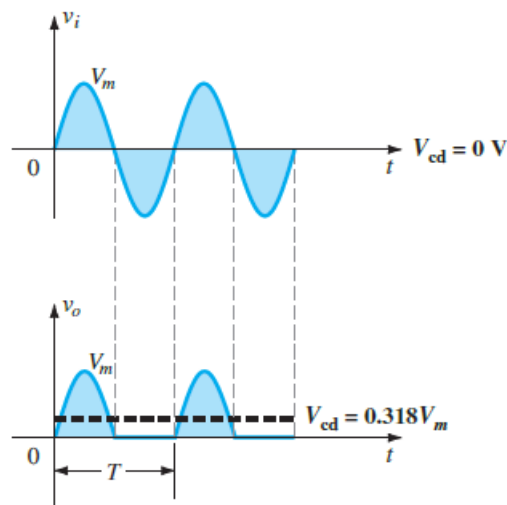
**FIG. 2.45**

*Región de conducción ( $0 \rightarrow T/2$ ).*



**FIG. 2.46**

*Región de no conducción ( $T/2 \rightarrow T$ ).*



**FIG. 2.47**

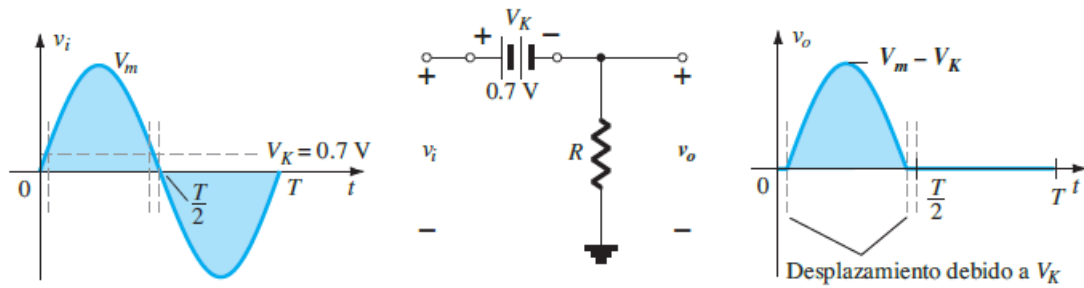
*Señal rectificada de media onda.*

$$V_{cd} = 0.318 V_m \quad \text{media onda}$$

(2.7)

El proceso de eliminar la señal de entrada de media onda para establecer un nivel de cd se llama *rectificación de media onda*.





**FIG. 2.48**

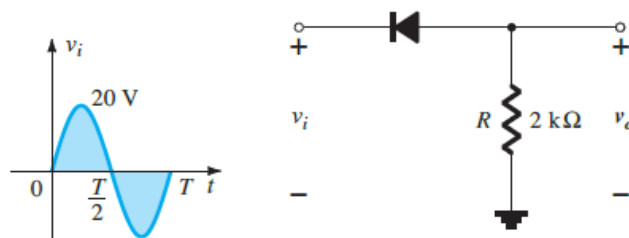
*Efecto de  $V_K$  sobre una señal rectificadora de media onda.*

$$V_{cd} \cong 0.318(V_m - V_K)$$

(2.8)

### EJEMPLO 2.16

- Trace la salida  $v_o$  y determine el nivel de cd para la red de la figura 2.49.
- Repita la parte (a) con el diodo ideal reemplazado por un diodo de silicio.
- Repita las partes (a) y (b) si  $V_m$  se incrementa a 200 V, y compare las soluciones usando las ecuaciones (2.7) y (2.8).



**FIG. 2.49**

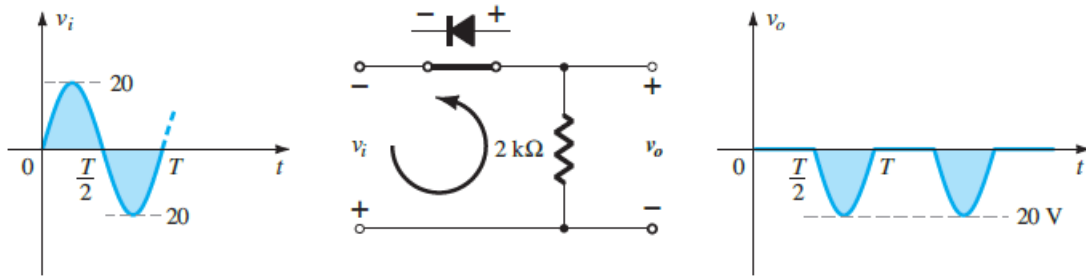
*Red del ejemplo 2.16.*

**Solución:**

- a. En esta situación el diodo conducirá durante la parte negativa de la entrada como se muestra en la figura 2.50, donde también aparecerá  $v_o$ . Durante todo del periodo, el nivel de cd es

$$V_{cd} = -0.318V_m = -0.318(20 \text{ V}) = -6.36 \text{ V}$$

El signo negativo indica que la polaridad de la salida es opuesta a la polaridad definida de la figura 2.49.



**FIG. 2.50**

$v_o$  resultante para el circuito del ejemplo 2.16.

- b. Para un diodo de silicio, la salida tiene la apariencia de la figura 2.51 y

$$V_{cd} \cong -0.318(V_m - 0.7 \text{ V}) = -0.318(19.3 \text{ V}) \cong -6.14 \text{ V}$$

La caída resultante en el nivel de cd es de 0.22 V, o alrededor de 3.5%.

- c. Ecuación (2.7):  $V_{cd} = -0.318 V_m = -0.318(200 \text{ V}) = -63.6 \text{ V}$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación (2.8): } V_{cd} &= -0.318(V_m - V_K) = -0.318(200 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) \\ &= -(0.318)(199.3 \text{ V}) = -63.38 \text{ V} \end{aligned}$$

Este valor es una diferencia que ciertamente puede ser ignorada en muchas aplicaciones. En la parte (c) el desplazamiento y la caída de la amplitud a causa de  $V_K$  no serían discernibles en un osciloscopio común si se despliega el patrón completo.

## 2.7 RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA

### Rectificador de puente

El nivel de cd obtenido a partir de una entrada senoidal se puede mejorar 100% mediante un proceso llamado *rectificación de onda completa*. La red más conocida para realizar tal función aparece en la figura 2.53 con sus cuatro diodos en una configuración de *puente*. Durante el periodo  $t = 0$  para  $T/2$  la polaridad de la entrada es como se muestra en la figura 2.54. Las polaridades resultantes a través de los diodos ideales también se muestran en la figura 2.54 para revelar que  $D_2$  y  $D_3$  están conduciendo, mientras que  $D_1$  y  $D_4$  están “apagados”. El resultado neto es la configuración de la figura 2.55 con su corriente y polaridad indicadas a través de  $R$ . Como los diodos son ideales, el voltaje de carga es  $v_o = v_i$ , como se muestra en la misma figura.

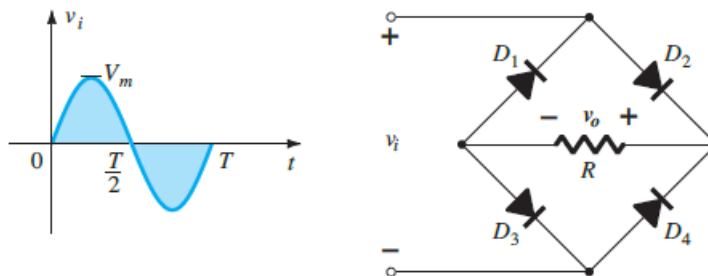


FIG. 2.53

*Rectificador de onda completa en configuración de puente.*

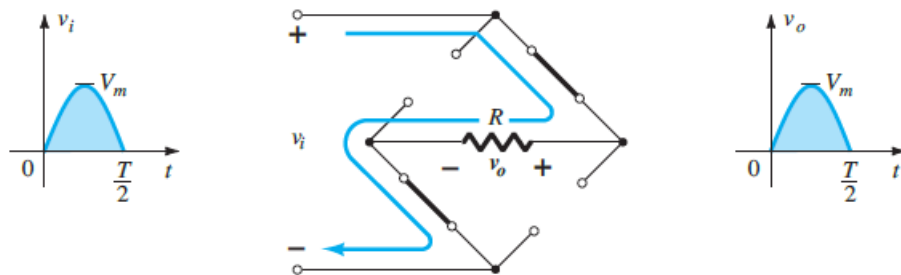
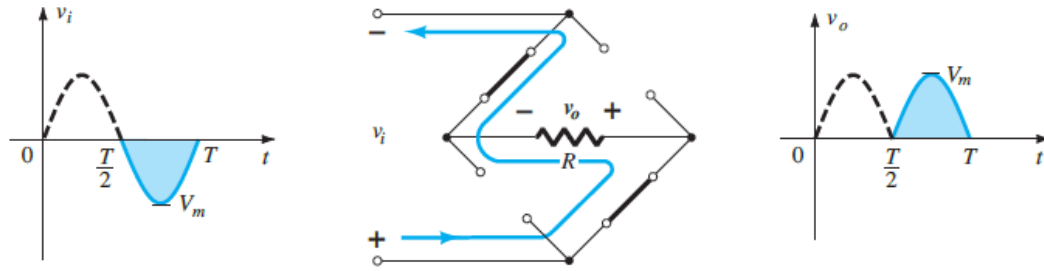


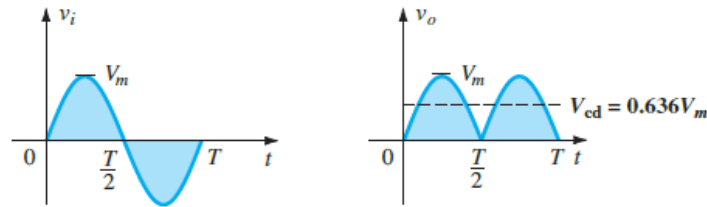
FIG. 2.55

*Ruta de conducción en la región positiva de  $v_i$ .*



**FIG. 2.56**

*Ruta de conducción en la región negativa de  $v_i$ .*



**FIG. 2.57**

*Formas de onda de entrada y salida para un rectificador de onda completa.*

Como el área sobre el eje durante un ciclo completo ahora es el doble de la obtenida por un sistema de media onda, el nivel de cd también se duplica y

$$V_{cd} = 2[\text{Ec. (2.7)}] = 2(0.318V_m)$$

o

$$V_{cd} = 0.636 V_m \quad \text{onda completa} \quad (2.10)$$

Por consiguiente, el valor pico del voltaje de salida  $v_o$  es

$$V_{o_{\max}} = V_m - 2V_K$$

En situaciones donde  $V_m \gg 2V_K$ , se puede aplicar la siguiente ecuación para el valor promedio con un nivel de precisión relativamente alto:

$$V_{cd} \cong 0.636(V_m - 2V_K) \quad (2.11)$$

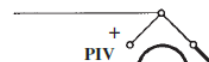
## PIV (PRV)

La capacidad de voltaje inverso pico (PIV) [o PRV (voltaje reverso pico)] del diodo es de primordial importancia en el diseño de sistemas de rectificación. Recuerde que no se debe exceder el valor nominal de voltaje en la región de polarización en inversa o el diodo entrará a la región de avalancha Zener. El valor nominal de PIV requerido para el rectificador de media onda se determina con la figura 2.52, la cual muestra el diodo polarizado en inversa de la figura 2.44 con un voltaje máximo aplicado. Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, es obvio que el valor nominal de PIV del diodo debe ser igual a o exceder el valor pico del voltaje aplicado. Por consiguiente,

$$\text{PIV nominal} \cong V_m \quad \text{Rectificador de media onda} \quad (2.9)$$

**PIV** El PIV requerido de cada diodo (ideal) se determina en la figura 2.59 obtenida en el pico de la región positiva. Para el lazo indicado el voltaje máximo a través de  $R$  es  $V_m$  y el valor nominal del PIV está definido por

$$\text{PIV} \cong V_m \quad \text{rectificador de puente de onda completa} \quad (2.12)$$



y

$$\text{PIV} \cong 2V_m \quad \text{Transformador con derivación central, rectificador de onda completa}$$

**EJEMPLO 2.17** Determine la forma de onda de salida para la red de la figura 2.64 y calcule el nivel de cd de salida y el PIV requerido de cada diodo.

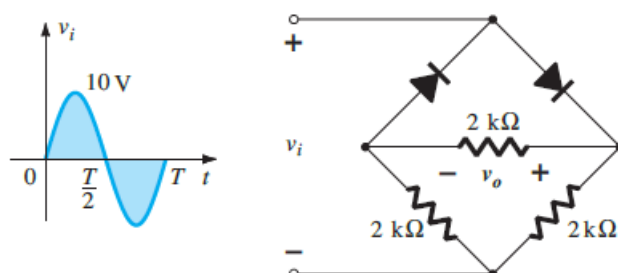


FIG. 2.64

Red en configuración de puente del ejemplo 2.17.

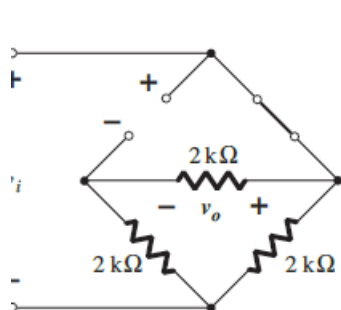


FIG. 2.65

4 en la región positiva de  $v_i$ .

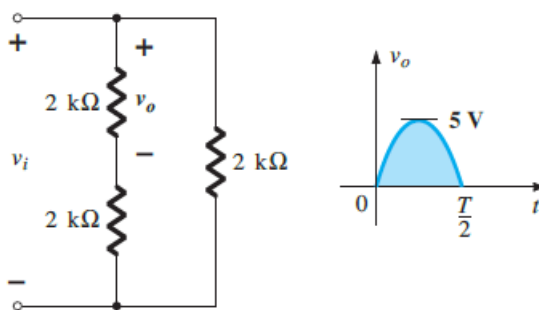


FIG. 2.66

Red de la figura 2.65 vuelta a dibujar.

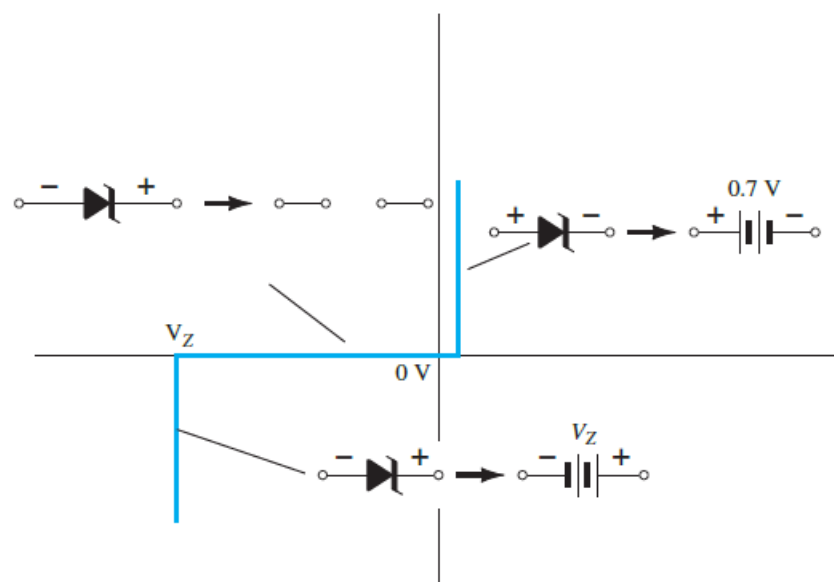
**Solución:** La red aparece como se muestra en la figura 2.65, con la región positiva del voltaje de entrada. Si se vuelve a dibujar la red se obtiene la configuración de la figura 2.66, donde  $v_o = \frac{1}{2}v_i$  o  $V_{o_{\max}} = \frac{1}{2}V_{i_{\max}} = \frac{1}{2}(10 \text{ V}) = 5 \text{ V}$ , como se muestra en la figura 2.66. En la parte negativa de la entrada los roles de los diodos se intercambian y  $v_o$  aparece como se muestra en la figura 2.67.

El efecto de quitar dos diodos de la configuración de puente es, por consiguiente, reducir el nivel de cd disponible al siguiente:

$$V_{\text{cd}} = 0.636(5 \text{ V}) = 3.18 \text{ V}$$

## 2.10 DIODOS ZENER

El análisis de redes que emplea diodos Zener es muy parecido al análisis de diodos semiconductores en secciones anteriores. En primer lugar se debe determinar el estado del diodo y luego se sustituye el modelo apropiado y se determinan las demás cantidades desconocidas de la red. La figura 2.102 repasa los circuitos equivalentes aproximados en cada región de un diodo Zener suponiendo aproximaciones de línea recta en cada punto de ruptura. Observe que se incluye la región de polarización directa porque de vez en cuando una aplicación también pasará por alto esta región.



**FIG. 2.102**

*Circuitos aproximados equivalentes del diodo Zener en las tres regiones de aplicación posibles.*

Los dos primeros ejemplos demuestran cómo se puede utilizar un diodo Zener para establecer niveles de voltaje de referencia y actuar como un dispositivo de protección. Entonces, el uso de un diodo Zener como *regulador* se describirá en detalle porque es una de sus principales áreas de aplicación. Un regulador es una combinación de elementos diseñados para garantizar que el voltaje de salida de una fuente permanezca más o menos constante.

**EJEMPLO 2.24** Determine los voltajes de referencias provistos por la red de la figura 2.103, la cual utiliza un LED blanco para indicar que está encendida. ¿Cuál es el nivel de la corriente a través del LED y la potencia suministrada por la fuente? ¿Cómo consume el LED la potencia en comparación con el diodo Zener de 6 V?

**Solución:** En primer lugar debemos comprobar que el voltaje aplicado es suficiente para encender todos los elementos de diodos en serie. El LED blanco tendrá una caída de alrededor de 4 V a través de él; los diodos Zener de 6 V y 3.3 V hacen un total de 9.3 V, y el diodo de silicio polarizado en directa tiene 0.7 V para un total de 14 V. Entonces los 40 V aplicados bastan para encender todos los elementos y, esperamos, establecer una corriente de operación apropiada.

Observe que se utilizó el diodo de silicio para crear un voltaje de referencia de 4 V debido a que

$$V_{o1} = V_{Z2} + V_K = 3.3 \text{ V} + 0.7 \text{ V} = 4.0 \text{ V}$$

Si el voltaje del diodo Zener de 6 V se combina con los 4 V el resultado es

$$V_{o2} = V_{o1} + V_{Z1} = 4 \text{ V} + 6 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

Por último, los 4 V a través del LED producirán un voltaje de  $40 \text{ V} - 14 \text{ V} = 26 \text{ V}$  a través del resistor, y

$$I_R = I_{LED} = \frac{V_R}{R} = \frac{40 \text{ V} - V_{o2} - V_{LED}}{1.3 \text{ k}\Omega} = \frac{40 \text{ V} - 10 \text{ V} - 4 \text{ V}}{1.3 \text{ k}\Omega} = \frac{26 \text{ V}}{1.3 \text{ k}\Omega} = 20 \text{ mA}$$

que producirán la brillantez apropiada para el LED.

La potencia suministrada por la fuente es el producto del voltaje alimentado por la corriente drenada como sigue:

$$P_s = EI_s = EI_R = (40 \text{ V})(20 \text{ mA}) = 800 \text{ mW}$$

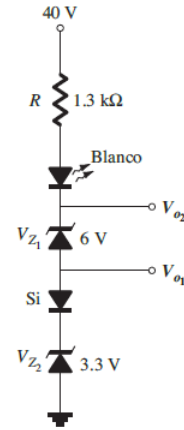
La potencia consumida por el LED es

$$P_{LED} = V_{LED}I_{LED} = (4 \text{ V})(20 \text{ mA}) = 80 \text{ mW}$$

y la potencia demandada por el diodo Zener de 6 V es

$$P_Z = V_Z I_Z = (6 \text{ V})(20 \text{ mA}) = 120 \text{ mW}$$

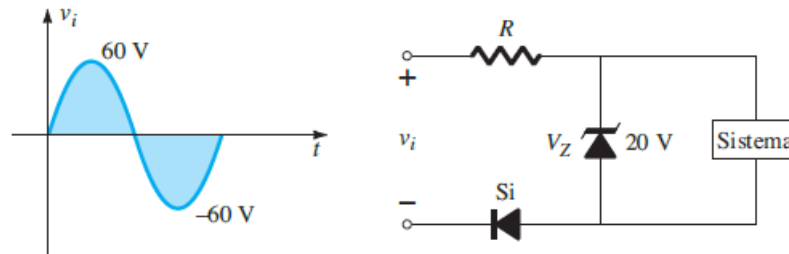
La potencia demandada por el diodo Zener supera la del LED por 40 mW.



**FIG. 2.103**

Circuito de ajuste de los voltajes de referencia para el ejemplo 2.24.

**EJEMPLO 2.25** La red de la figura 2.104 se diseñó para limitar el voltaje a 20 V durante la parte positiva del voltaje aplicado, y a 0 V durante una excursión negativa del voltaje aplicado. Compruebe su operación y trace la forma de onda del voltaje a través del sistema con la señal aplicada. Suponga que la resistencia de entrada del sistema es muy alta, por lo que no afectará el comportamiento de la red.



**FIG. 2.104**

Red de control para el ejemplo 2.25.

y

$$\text{PIV} \cong 2V_m$$

Transformador con derivación central, rectificador de onda completa

(2.13)

un voltaje de alimentación fijo y una carga variable y por último una carga fija y una alimentación variable.

### $V_i$ y $R$ fijos

Las redes más sencillas de reguladores Zener aparecen en la figura 2.106. El voltaje de cd aplicado es fijo, lo mismo que el resistor de carga. El análisis se puede dividir en dos pasos.

1. *Determine el estado del diodo Zener eliminándolo de la red y calculando el voltaje a través del circuito abierto resultante.*

Aplicando el paso 1 a la red de la figura 2.106 se obtiene la red de la figura 2.107, donde la aplicación de la regla del divisor de voltaje da por resultado

$$V = V_L = \frac{R_L V_i}{R + R_L}$$

$$R + R_L$$

Si  $V \geq V_Z$ , el diodo Zener está encendido y se puede sustituir el modelo equivalente apropiado. Si  $V < V_Z$ , el diodo está apagado y se sustituye la equivalencia de circuito abierto.

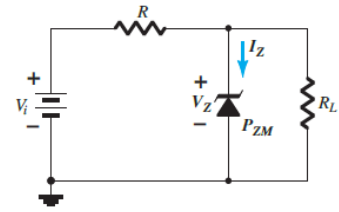
2. *Sustituya el circuito equivalente apropiado y resuelva para la cantidad desconocida deseada.*

Para la red de la figura 2.106, el estado “encendido” produce la red equivalente de la figura 2.108. Como los voltajes a través de los elementos en paralelo deben ser los mismos, encontramos que

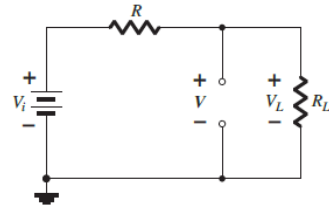
$$V_L = V_Z$$

(2.17)

$$V_L = V_Z$$

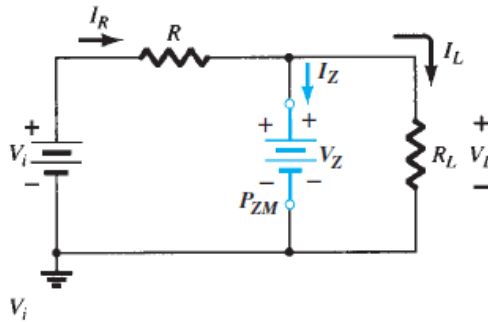


**FIG. 2.106**  
Regulador Zener básico.



**FIG. 2.107**  
Determinación del estado del diodo Zener.

(2.17)



**FIG. 2.108**  
Sustitución del equivalente Zener en la situación de “encendido”.

La corriente a través del diodo Zener se determina con la ley de corrientes de Kirchhoff. Es decir,

$$I_R = I_Z + I_L$$

y

$$I_Z = I_R - I_L$$

(2.18)

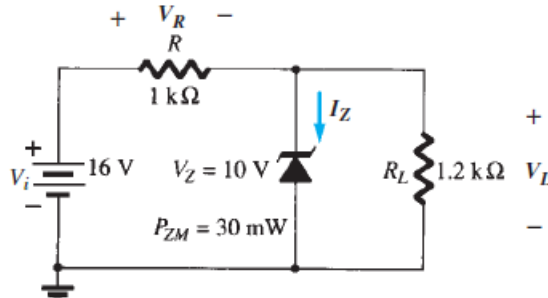
$$P_Z = V_Z I_Z$$

(2.19)



## EJEMPLO 2.26

- Para la red del diodo Zener de la figura 2.109, determine  $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_Z$  y  $P_Z$ .
- Repita la parte (a) con  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ .

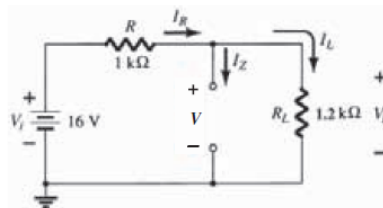


**FIG. 2.109**

*Regulador de diodo Zener del ejemplo 2.26.*

**Solución:**

- Siguiendo el procedimiento sugerido, dibujamos de nuevo la red mostrada en la figura 2.110.



**FIG. 2.110**

*Determinación de  $V$  para el regulador de la figura 2.109.*

Aplicando la ecuación (2.16) el resultado es

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{1.2 \text{ k}\Omega (16 \text{ V})}{1 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega} = 8.73 \text{ V}$$

Como  $V = 8.73 \text{ V}$  es menor que  $V_Z = 10 \text{ V}$ , el diodo está “apagado”, como se muestra en las características de la figura 2.111. Sustituyendo los resultados del circuito abierto equivalente en la misma red de la figura 2.110, donde encontramos que

$$V_L = V = 8.73 \text{ V}$$

$$V_R = V_i - V_L = 16 \text{ V} - 8.73 \text{ V} = 7.27 \text{ V}$$

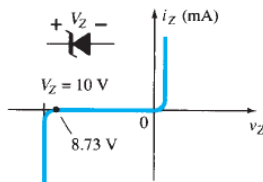
$$I_Z = 0 \text{ A}$$

$$P_Z = V_Z I_Z = V_Z (0 \text{ A}) = 0 \text{ W}$$

y

- Aplicando la ecuación (2.16) resulta

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{3 \text{ k}\Omega (16 \text{ V})}{1 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ V}$$



**FIG. 2.111**

*Punto de operación resultante para la red de la figura 2.109.*

Como  $V = 12 \text{ V}$  es mayor que  $V_Z = 10 \text{ V}$ , el diodo está “encendido” y se obtiene la red de la figura 2.112. Aplicando la ecuación (2.17) obtenemos

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

y 
$$V_R = V_i - V_L = 16 \text{ V} - 10 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

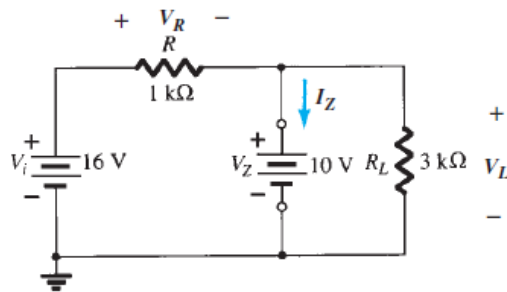
con 
$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 3.33 \text{ mA}$$

y 
$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 6 \text{ mA}$$

de modo que 
$$I_Z = I_R - I_L [\text{Eq. (2.18)}]$$
  

$$= 6 \text{ mA} - 3.33 \text{ mA}$$
  

$$= 2.67 \text{ mA}$$



**FIG. 2.112**

Red de la figura 2.109 “encendida”.

La potencia disipada es

$$P_Z = V_Z I_Z = (10 \text{ V})(2.67 \text{ mA}) = 26.7 \text{ mW}$$

la cual es menor que la  $P_{ZM} = 30 \text{ mW}$  especificada.

### **$V_i$ fijo, $R_L$ variable**

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$

$$R_{L_{\min}} = \frac{R V_Z}{V_i - V_Z} \quad (2.20)$$

$$I_{L_{\max}} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_{L_{\min}}} \quad (2.21)$$

Una vez que el diodo se “enciende”, el voltaje  $R$  permanece fijo en

$$V_R = V_i - V_Z \quad (2.22)$$

e  $I_R$  permanece fija en

$$I_R = \frac{V_R}{R} \quad (2.23)$$

La corriente Zener

$$I_Z = I_R - I_L \quad (2.24)$$

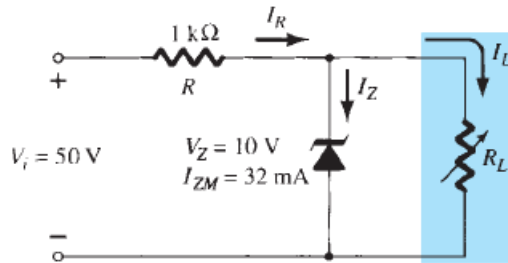
$$I_{L_{\min}} = I_R - I_{ZM} \quad (2.25)$$

y la resistencia de carga máxima como

$$R_{L_{\max}} = \frac{V_Z}{I_{L_{\min}}} \quad (2.26)$$

### EJEMPLO 2.27

- Para la red de la figura 2.113, determine los intervalos de  $R_L$  e  $I_L$  que hagan que  $V_{RL}$  se mantenga en 10 V.
- Determine el valor nominal máximo de potencias del diodo en watts.



**FIG. 2.113**

*Regulador de voltaje del ejemplo 2.27.*

### Solución:

- Para determinar el valor de  $R_L$  que encenderá el diodo Zener, aplique la ecuación (2.20):

$$R_{L_{\min}} = \frac{RV_Z}{V_i - V_Z} = \frac{(1\text{ k}\Omega)(10\text{ V})}{50\text{ V} - 10\text{ V}} = \frac{10\text{ k}\Omega}{40} = 250\ \Omega$$

El voltaje a través del resistor  $R$  se determina entonces con la ecuación (2.22):

$$V_R = V_i - V_Z = 50\text{ V} - 10\text{ V} = 40\text{ V}$$

y la ecuación (2.23) da la magnitud de  $I_R$ :

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{40\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 40\text{ mA}$$

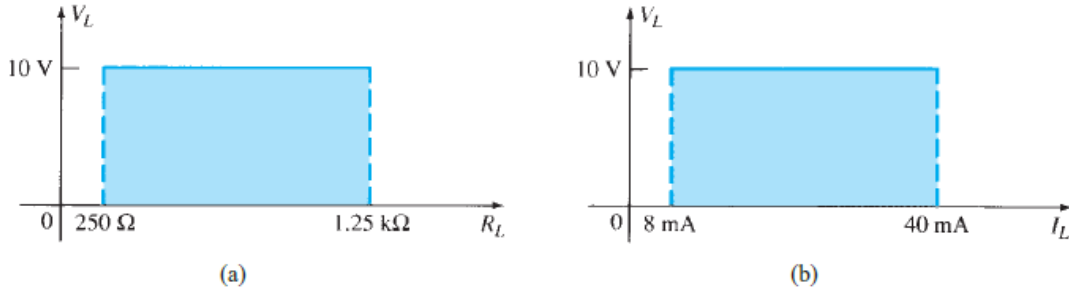
El nivel mínimo de  $I_L$  se determina luego con la ecuación (2.25):

$$I_{L_{\min}} = I_R - I_{ZM} = 40\text{ mA} - 32\text{ mA} = 8\text{ mA}$$

Con la ecuación (2.26) se determina el valor máximo de  $R_L$ :

$$R_{L_{\max}} = \frac{V_Z}{I_{L_{\min}}} = \frac{10 \text{ V}}{8 \text{ mA}} = 1.25 \text{ k}\Omega$$

En la figura 2.114a aparece una gráfica de  $V_L$  contra  $R_L$  y de  $V_L$  contra  $I_L$  en la figura 2.114b.



**FIG. 2.114**

$V_L$  contra  $R_L$  e  $I_L$  para el regulador de la figura 2.113.

b.  $P_{\max} = V_Z I_{ZM}$   
 $= (10 \text{ V})(32 \text{ mA}) = 320 \text{ mW}$

### $R_L$ fija, $V_i$ variable

Para valores fijos de  $R_L$  en la figura 2.106, el voltaje debe ser lo bastante grande para encender el diodo Zener. El voltaje de encendido mínimo  $V_i = V_{i_{\min}}$  se determina como sigue

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R}$$

y

$$V_{i_{\min}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L} \quad (2.27)$$

La corriente Zener máxima limita el valor máximo de  $V_i$ . Como  $I_{ZM} = I_R - I_L$ ,

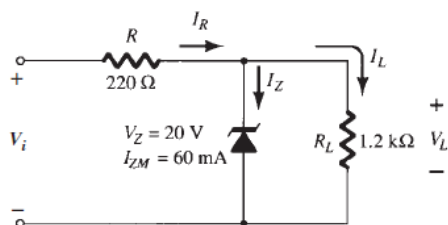
$$I_{R_{\max}} = I_{ZM} + I_L \quad (2.28)$$

Como  $I_L$  se mantiene fija a  $V_Z/R_L$  e  $I_{ZM}$  es el valor máximo de  $I_Z$ , el  $V_i$  máximo se define como

$$V_{i_{\max}} = V_{R_{\max}} + V_Z$$

$$V_{i_{\max}} = I_{R_{\max}} R + V_Z \quad (2.29)$$

**EJEMPLO 2.28** Determine el intervalo de valores de  $V_i$  que mantendrá “encendido” el diodo Zener de la figura 2.115.



**FIG. 2.115**  
Regulador del ejemplo 2.28.

www.elsolucionario.net

#### APLICACIONES DEL DIODO

**Solución:**

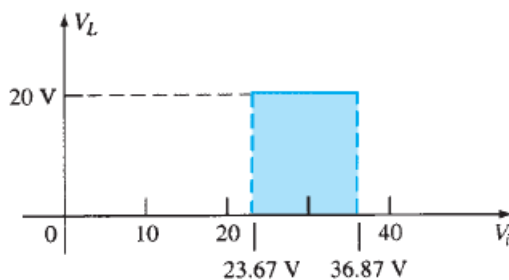
$$\text{Ec. (2.27): } V_{i_{\min}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L} = \frac{(1200 \Omega + 220 \Omega)(20 \text{ V})}{1200 \Omega} = 23.67 \text{ V}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20 \text{ V}}{1.2 \text{ k}\Omega} = 16.67 \text{ mA}$$

$$\text{Ec. (2.28): } I_{R_{\max}} = I_{ZM} + I_L = 60 \text{ mA} + 16.67 \text{ mA} = 76.67 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} \text{Ec. (2.29): } V_{i_{\max}} &= I_{R_{\max}} R + V_Z \\ &= (76.67 \text{ mA})(0.22 \text{ k}\Omega) + 20 \text{ V} \\ &= 16.87 \text{ V} + 20 \text{ V} \\ &= 36.87 \text{ V} \end{aligned}$$

La figura 2.116 da una gráfica de  $V_L$  contra  $V_i$ .



**FIG. 2.116**  
 $V_L$  contra  $V_i$  para el regulador de la figura 2.115.