

Aplicaciones de diodos

2

2.1 INTRODUCCIÓN

La construcción, características y modelos de los diodos semiconductores se analizaron en el capítulo 1. El objetivo principal del presente capítulo es desarrollar un amplio conocimiento práctico sobre el diodo en una variedad de configuraciones utilizando los modelos adecuados para el área de aplicación. Una vez que concluya este capítulo, se comprenderá con claridad el patrón básico de comportamiento de los diodos en las redes de dc y ac. Los conceptos que aprenda en este capítulo aparecerán de manera recurrente en los subsiguientes. Por ejemplo, los diodos se utilizan a menudo en la descripción de la construcción básica de los transistores y en el análisis de las redes de transistores en dc y ac.

El contenido de este capítulo revela una faceta interesante y muy positiva del estudio de un campo tal como el de los dispositivos electrónicos y los sistemas; una vez que se comprende con claridad el comportamiento básico de un dispositivo, se pueden determinar su función y respuesta en una variedad infinita de configuraciones. El rango de aplicaciones no tiene fin; sin embargo, las características y los modelos no sufren cambio alguno. El análisis abarcará desde el que emplea las características reales del diodo hasta el que utiliza, casi exclusivamente, modelos aproximados. Es importante que la función y respuesta de varios elementos dentro de un sistema electrónico se comprendan sin tener que repasar de forma continua procedimientos matemáticos prolongados y tediosos. Por lo general, esto se lleva a cabo a través del proceso de aproximación, el cual por sí mismo se puede considerar un arte. Si bien los resultados que se obtienen al utilizar las características reales pueden diferir un poco de aquellos en los que se requiere una serie de aproximaciones, tenga en cuenta que también las características obtenidas de la hoja de especificaciones pueden ser un poco distintas a las que se obtengan del uso real del dispositivo. En otras palabras, las características de un diodo semiconductor 1N4001 pueden variar de un elemento a otro dentro de un mismo lote. La variación puede ser ligera, pero a menudo será suficiente para validar las aproximaciones utilizadas en el análisis. También se deben considerar los otros elementos de la red. ¿Es la resistencia nominal de $100\ \Omega$ exactamente igual a $100\ \Omega$? ¿El voltaje aplicado es exactamente igual a $10\ \text{V}$ o quizá $10.08\ \text{V}$? Todas estas tolerancias contribuyen a la creencia general en cuanto a que una respuesta determinada mediante un conjunto adecuado de aproximaciones, quizá resulte tan “exacta” como una en la que se utilizan las características en su totalidad. En este libro el énfasis se centra en el desarrollo de un conocimiento práctico de un dispositivo, mediante la utilización de las aproximaciones adecuadas, evitando así un nivel innecesario de complejidad matemática. Sin embargo, también se proporcionan detalles suficientes con objeto de permitir que quien lo desee, esté en condiciones de realizar un análisis matemático minucioso.

2.2 ANÁLISIS MEDIANTE LA RECTA DE CARGA

Normalmente, la carga aplicada tendrá un impacto importante en el punto o región de operación del dispositivo. Si el análisis se debe llevar a cabo de manera gráfica, se puede dibujar una línea recta sobre las características del dispositivo que represente la carga aplicada. La intersección de la recta de carga con las características determinará el punto de operación del sistema. Por razones obvias, a este análisis se le llama *análisis mediante la recta de carga*. Aunque la mayor parte de las redes de diodos que se analizan en este capítulo no utilizan el sistema de la recta de carga, la técnica se usa de manera frecuente en los capítulos siguientes, y esta introducción ofrece la aplicación más simplificada del método. Permite de igual forma una validación de la aproximación de la técnica descrita a lo largo del resto del capítulo.

Considere la red de la figura 2.1 que utiliza un diodo, el cual tiene las características de la figura 2.1b. Obsérvese en la figura 2.1a que la “presión” que proporciona la batería tiene como objetivo establecer una corriente a través del circuito en serie, de acuerdo con el sentido de las manecillas del reloj. El hecho de que esta corriente y la dirección de conducción definida del diodo sean “semejantes”, indica que el diodo está en estado “encendido” y que se establece la conducción. La polaridad resultante a través del diodo será como se señala, y el primer cuadrante (V_D e I_D positivos) de la figura 2.1b será la región de interés, es decir, la región de polarización directa.

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito en serie de la figura 2.1a dará por resultado

$$E - V_D - V_R = 0$$

o

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

Las dos variables en la ecuación (2.1) (V_D e I_D) son las mismas que las variables de los ejes del diodo de la figura 2.1b. Esta similitud permite una graficación de la ecuación (2.1) sobre las mismas características de la figura 2.1b.

Las intersecciones de la recta de carga sobre las características pueden determinarse con facilidad si se considera que en cualquier lugar del eje horizontal $I_D = 0$ A y que en cualquier lugar del eje vertical $V_D = 0$ V.

Si se establece $V_D = 0$ V en la ecuación (2.1) y se resuelve para I_D , se tiene una magnitud de I_D sobre el eje vertical. Por tanto, con $V_D = 0$ V la ecuación (2.1) se convierte en

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

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

como lo indica la figura 2.2. Si se establece $I_D = 0$ A en la ecuación (2.1) y se resuelve para V_D , se tiene la magnitud de V_D sobre el eje vertical. Por tanto, con $I_D = 0$ A la ecuación (2.1) se convierte en

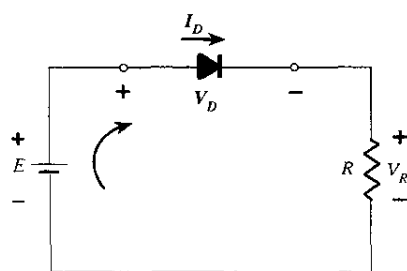
$$\begin{aligned} E &= V_D + I_D R \\ &= V_D + (0 \text{ A})R \end{aligned}$$

y

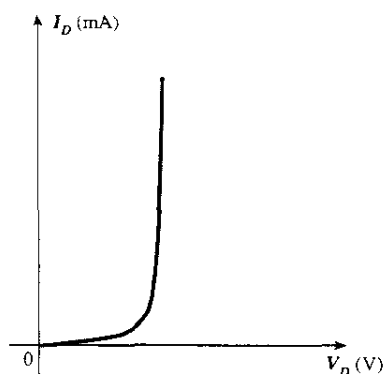
$$V_D = E |_{I_D = 0 \text{ A}} \quad (2.3)$$

como lo señala la figura 2.2. Una línea recta dibujada entre los dos puntos definirá una recta de carga como la descrita en la figura 2.2. Si se cambia el nivel de R (la carga), cambiará la intersección sobre el eje vertical. El resultado será un cambio en la pendiente de la recta de carga, y en un punto de intersección diferente entre la recta de carga y las características del dispositivo.

Ahora se tiene una recta de carga definida por la red y una curva de características definida por el dispositivo. El punto de intersección entre las dos es el punto de operación para este



(a)



(b)

Figura 2.1 Configuración de diodo en serie: a) circuito; b) características.

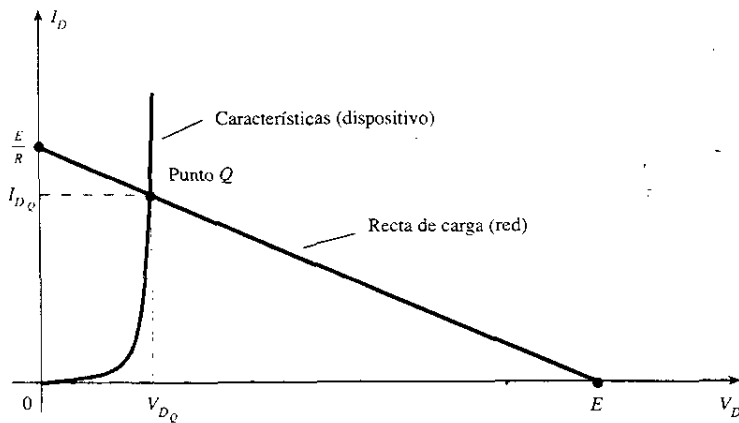


Figura 2.2 Dibujo de la recta de carga y la selección del punto de operación.

circuito. Mediante el sencillo dibujo de una línea recta hacia abajo hasta el eje horizontal puede determinarse el voltaje del diodo V_{DQ} , mientras que una línea horizontal a partir del punto de intersección y hasta el eje vertical dará el nivel de I_{DQ} . La corriente I_D es en realidad la corriente a través de toda la configuración en serie de la figura 2.1a. En general, al punto de operación se le llama *punto estable* (abreviado “Q-pt”, por las palabras en inglés de: *Quiescent Point*) y refleja sus cualidades de “estable y sin movimiento” según se definió para una red de dc.

La solución que se obtiene por la intersección de las dos curvas es la misma que podría conseguirse mediante la solución matemática de las ecuaciones simultáneas (2.1) y (1.4) [$I_D = I_S(e^{KV_D/T_K} - 1)$]. Puesto que la curva para un diodo tiene características no lineales, las matemáticas involucradas requerirían del uso de técnicas no lineales que están fuera de las necesidades y objetivo de este libro. El análisis de la recta de carga descrito antes ofrece una solución con un mínimo de esfuerzo, y una descripción “pictórica” de la razón por la cual se obtuvieron los niveles de solución para V_{DQ} e I_{DQ} . Los siguientes dos ejemplos demostrarán las técnicas que se presentaron, las cuales ofrecen una facilidad relativa con la que puede dibujarse la recta de carga utilizando las ecuaciones (2.2) y (2.3).

Determinar para la configuración de diodos en serie de la figura 2.3a usando las características de diodo de la figura 2.3b:

EJEMPLO 2.1

- V_{DQ} e I_{DQ} .
- V_R .

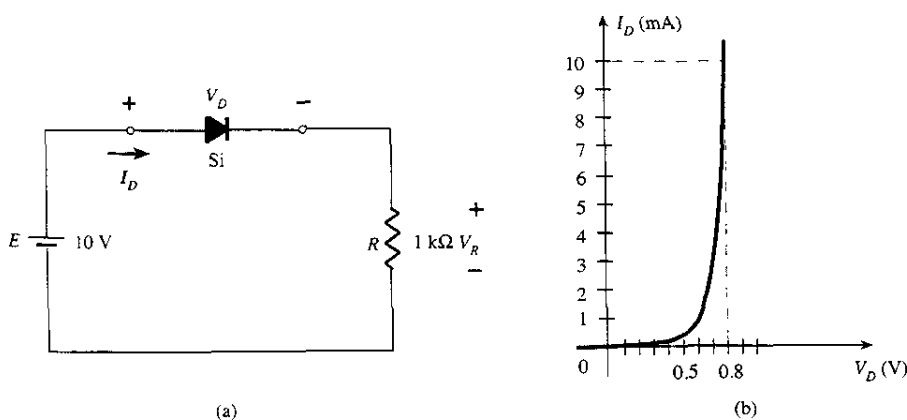


Figura 2.3 a) Circuito; b) características.

2.2 Análisis mediante la recta de carga

Solución

a) La ecuación (2.2): $I_D = \frac{E}{R} \bigg|_{V_D = 0 \text{ V}} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$

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

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

$$\begin{aligned} V_{D_Q} &\cong 0.78 \text{ V} \\ I_{D_Q} &\cong 9.25 \text{ mA} \end{aligned}$$

El nivel de V_D es una estimación y la exactitud de I_D está limitada por la escala elegida. Un grado más alto de exactitud requeriría de una gráfica mucho más grande.

b) $V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (9.25 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 9.25 \text{ V}$

o $V_R = E - V_D = 10 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 9.22 \text{ V}$

La diferencia en los resultados se debe a la exactitud con la cual se pueda leer la gráfica. Es ideal cuando los resultados que se obtienen de una u otra manera son los mismos.

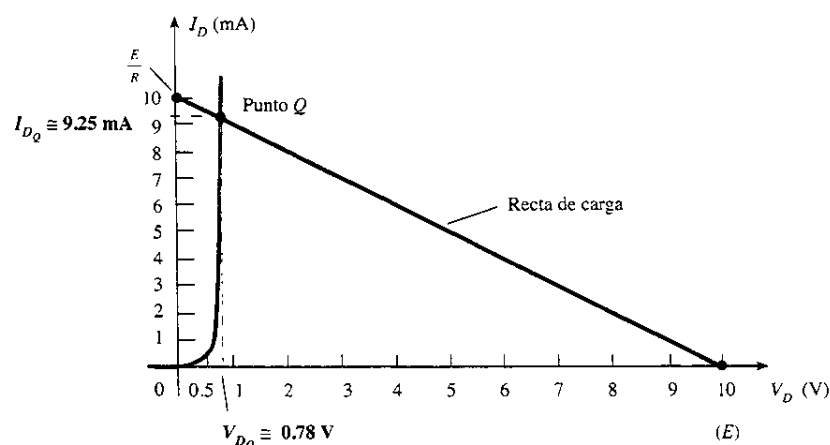


Figura 2.4 Solución al ejemplo 2.1.

EJEMPLO 2.2

Repetir el análisis del ejemplo 2.1 con $R = 2 \text{ k}\Omega$.

Solución

a) La ecuación (2.2): $I_D = \frac{E}{R} \bigg|_{V_D = 0 \text{ V}} = \frac{10 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}$

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

La recta de carga resultante aparece en la figura 2.5. Obsérvese la pendiente reducida y los niveles de corriente del diodo para las cargas crecientes. El punto Q resultante está definido por

$$\begin{aligned} V_{D_Q} &\cong 0.7 \text{ V} \\ I_{D_Q} &\cong 4.6 \text{ mA} \end{aligned}$$

b) $V_R = I_R R = I_{D_Q} R = (4.6 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega) = 9.2 \text{ V}$

con $V_R = E - V_D = 10 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 9.3 \text{ V}$

La diferencia en los niveles se debe, una vez más, a la exactitud con la cual se pueda leer la gráfica. Es cierto que los resultados ofrecen una magnitud esperada para el voltaje V_R .

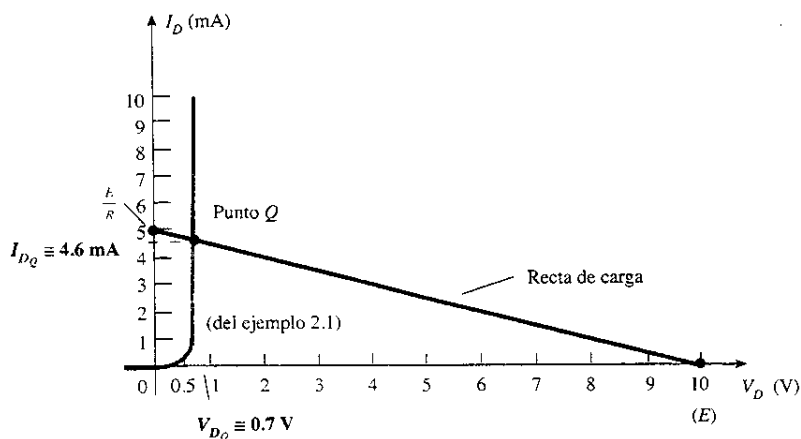


Figura 2.5 Solución al ejemplo 2.2.

Como se observa en los ejemplos anteriores, la recta de carga está determinada sólo por la red aplicada, mientras las características están definidas para el dispositivo elegido. Si se recurre al modelo aproximado para el diodo y no se cambia la red, la recta de carga será exactamente la misma que se obtuvo en los ejemplos anteriores. De hecho, los siguientes dos ejemplos repiten el análisis de los ejemplos 2.1 y 2.2 mediante el empleo del modelo aproximado para permitir una comparación de los resultados.

Repetir el ejemplo 2.1 usando el modelo equivalente aproximado para el diodo semiconductor de silicio.

EJEMPLO 2.3

Solución

Se dibuja de nuevo la recta de carga según se muestra en la figura 2.6, con la misma intersección como se definió en el ejemplo 2.1. Las características del circuito equivalente aproximado para el diodo también se han trazado en la misma gráfica. El punto Q resultante:

$$V_{D_Q} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 9.25 \text{ mA}$$

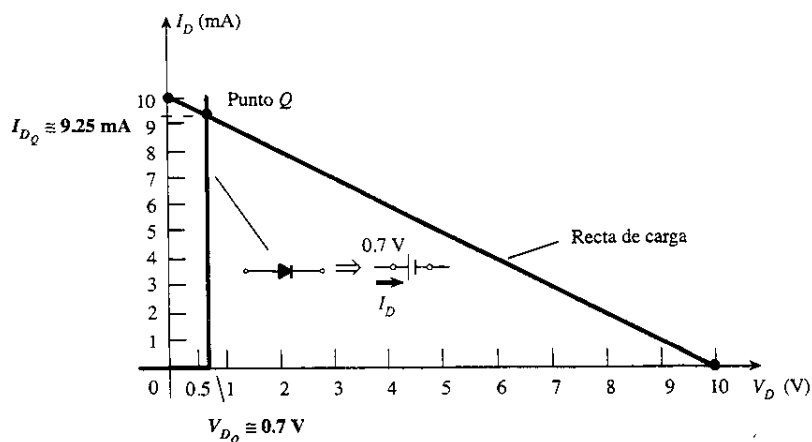


Figura 2.6 Solución al ejemplo 2.1 usando el modelo aproximado del diodo.

Los resultados que se obtienen en el ejemplo 2.3 son muy interesantes, porque el nivel de I_{D_Q} es exactamente el mismo que el del ejemplo 2.1 empleando una curva de características que resulta mucho más fácil dibujar que la que aparece en la figura 2.4. El nivel de $V_D \approx 0.7$ V contra 0.78 V del ejemplo 2.1 tiene una diferencia en magnitud del orden de las centésimas, pero es cierto que están en la misma vecindad, si se comparan sus magnitudes con las de los otros voltajes en la red.

EJEMPLO 2.4

Repetir el ejemplo 2.2 usando el modelo equivalente aproximado para el diodo semiconductor de silicio.

Solución

La recta de carga se dibuja de nuevo como lo indica la figura 2.7, con la misma intersección definida en el ejemplo 2.2. Las características del circuito equivalente aproximado para el diodo también se dibujaron en la misma gráfica. El punto Q resultante:

$$V_{D_Q} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 4.6 \text{ mA}$$

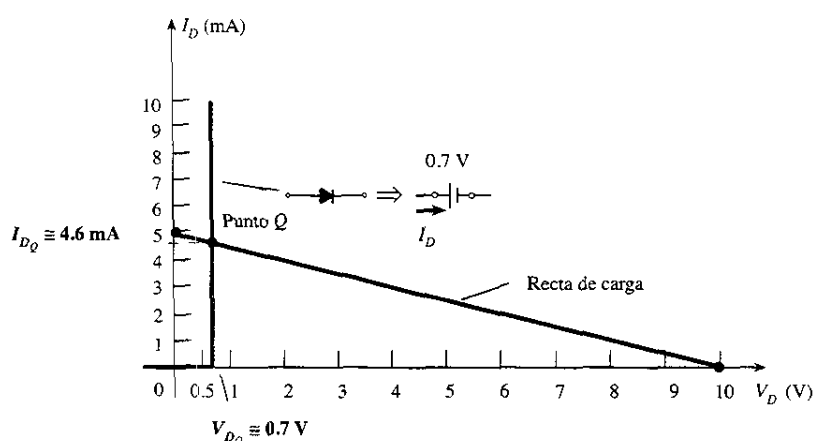


Figura 2.7 Solución al ejemplo 2.2 utilizando el modelo aproximado del diodo.

En el ejemplo 2.4 los resultados que se obtienen tanto para V_{D_Q} como para I_{D_Q} son los mismos que los que resultaron empleando las características completas en el ejemplo 2.2. Los ejemplos anteriores demuestran que los niveles de corriente y voltaje que se obtuvieron al utilizar el modelo aproximado, son muy cercanos a los que resultaron al utilizar las características completas. Esto sugiere, como se verá al aplicarlo en las próximas secciones, que el uso de las aproximaciones adecuadas puede dar como resultado la obtención de soluciones que son muy cercanas a la respuesta real con un nivel reducido de incertidumbre acerca de la reproducción adecuada de las características, eligiendo a su vez una escala lo suficiente grande. Los resultados indicarán las condiciones que deben ser satisfechas para poder aplicar el equivalente ideal de forma adecuada.

EJEMPLO 2.5

Repetir el ejemplo 2.1 usando el modelo del diodo ideal.

Solución

En la figura 2.8 se mostró cómo la recta de carga continúa siendo la misma, pero ahora las características ideales se intersecan con la recta de carga en el eje vertical. Por tanto, el punto Q está definido por

$$V_{D_Q} = 0 \text{ V}$$

$$I_{D_Q} = 10 \text{ mA}$$

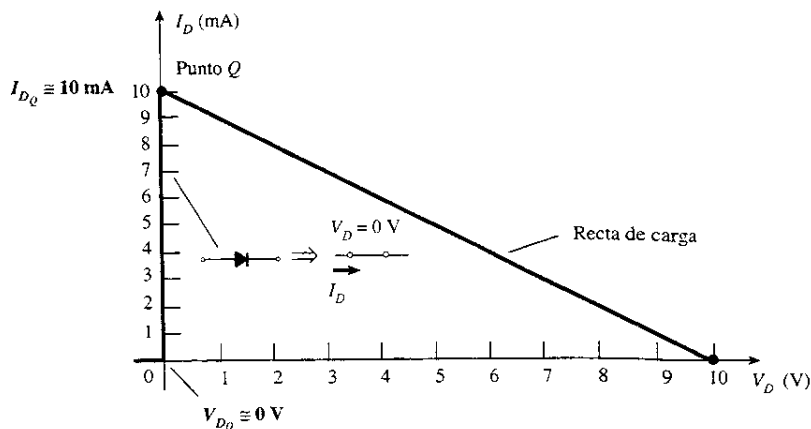


Figura 2.8 Solución al ejemplo 2.1 usando el modelo del diodo ideal.

Los resultados son lo suficientemente diferentes para las soluciones del ejemplo 2.1 como para causar una incertidumbre acerca de su exactitud. Es cierto que ofrecen alguna indicación acerca del nivel de voltaje y corriente que deben esperarse para otros niveles de voltaje de la red, pero el esfuerzo adicional de incluir el equivalente de 0.7 V, muestra que el método del ejemplo 2.3 es más apropiado.

Por tanto, el uso del modelo del diodo ideal debe reservarse para aquellas ocasiones cuando la función de un diodo sea más importante, que los niveles de voltaje que pueden variar en décimas de un volt, y en las situaciones donde los voltajes aplicados son de manera considerable más grandes que el voltaje de umbral V_T . En las siguientes secciones se usará en forma casi exclusiva el modelo aproximado, ya que los niveles de voltaje que resulten serán sensibles a las variaciones que se aproximan a V_T . También en secciones posteriores se usará el modelo ideal con mayor frecuencia debido a que los voltajes aplicados serán un poco más altos que V_T , y los autores desean asegurarse que la función del diodo quede comprendida en forma correcta y clara.

2.3 APROXIMACIONES DE DIODOS

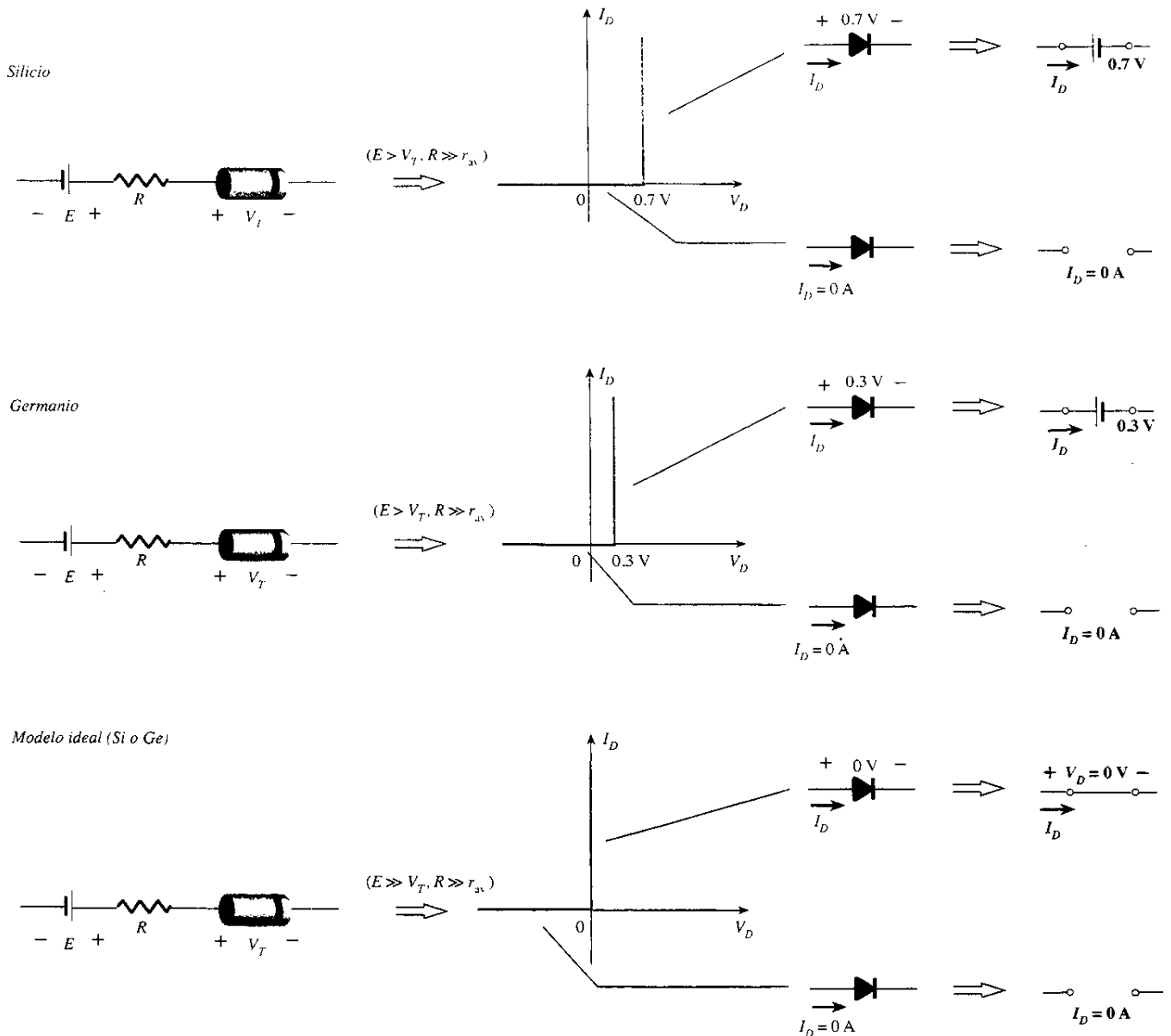
En la sección 2.2 se indicó que los resultados que se obtuvieron al emplear el modelo equivalente de segmentos lineales fueron muy cercanos, si no iguales, a la respuesta obtenida al utilizar las características de manera completa. De hecho, si se consideran todas las posibles variaciones debidas a las tolerancias, temperaturas, y así sucesivamente, se podría considerar una solución “tan exacta” como la otra. Debido a que el uso del modelo aproximado genera los resultados que se desean después de un tiempo y esfuerzo reducidos, será entonces el sistema empleado en este libro, a menos que se especifique lo contrario. Recuerde lo siguiente:

El propósito básico de este libro es desarrollar un conocimiento general acerca del comportamiento, capacidades y áreas posibles de aplicación de un dispositivo, de manera que minimice la necesidad de extensos desarrollos matemáticos.

El modelo equivalente de segmentos lineales completo se presentó en el capítulo 1, y no se utilizó en el análisis de la recta de carga debido a que r_{av} suele ser mucho menor que los otros elementos en serie de la red. Si r_{av} fuera cercano en magnitud a los otros elementos en serie de la red, el modelo equivalente completo podría aplicarse de la misma forma como se describió en la sección 2.2.

Con la finalidad de preparar el análisis que se presentará, se desarrolló la tabla 2.1 para repasar las características más importantes, los modelos y las condiciones de aplicación de los modelos aproximados e ideales de los diodos. Aunque el diodo de silicio se usa en forma casi

TABLA 2.1 Modelos de diodo semiconductor aproximado e ideal



exclusiva debido a sus características de temperatura, todavía se utiliza el diodo de germanio, y por tanto se incluye en la figura 2.1. De la misma manera que el diodo de silicio, un diodo de germanio se aproxima mediante un equivalente de circuito abierto para los voltajes menores que V_f . Entrará al estado “encendido” cuando $V_D \geq V_f = 0.3 \text{ V}$.

Tenga en cuenta que el 0.7 V y el 0.3 V en los circuitos equivalentes no son fuentes independientes de energía, pero están ahí sólo para que recuerde que existe un “precio que debe pagarse” por encender un diodo. Un diodo aislado en la mesa de laboratorio no indicará 0.7 V o 0.3 V si se coloca un voltímetro en sus terminales. Los fabricantes especifican la caída de voltaje a través de cada uno cuando el dispositivo se encuentra en “encendido”, y detallan que el voltaje del diodo debe ser por lo menos del nivel que se indica antes que la conducción pueda establecerse.

En las siguientes secciones se demostrará el impacto de los modelos de la tabla 2.1 sobre el análisis de las configuraciones de los diodos. Para las situaciones en que se emplee el circuito equivalente aproximado, el símbolo del diodo aparecerá como lo señala la figura 2.9a para los diodos de silicio y de germanio. Si las condiciones son las que podrían usarse en el modelo del diodo ideal, el símbolo del diodo aparecerá como lo indica la figura 2.9b.

2.4 CONFIGURACIONES DE DIODOS EN SERIE CON ENTRADAS DE DC

En esta sección se usará el modelo aproximado para investigar una variedad de configuraciones de diodos en serie con entradas de dc. Dicho contenido establece los fundamentos en el análisis de diodos que se aplicarán en las secciones y capítulos siguientes. El procedimiento descrito podrá aplicarse a redes con cualquier número de diodos y en una variedad de configuraciones.

Primero, para cada configuración debe determinarse el estado de cada diodo. ¿Cuáles diodos se encuentran en “encendido” y cuáles en “apagado”? Una vez que esto se hace, se puede sustituir el equivalente adecuado como se definió en la sección 2.3 y determinar los parámetros restantes de la red determinada.

En general, un diodo está en estado “encendido” si la corriente establecida por las fuentes aplicadas es tal que su dirección concuerda con la flecha del símbolo del diodo, y $V_D \geq 0.7$ V para el silicio y $V_D \geq 0.3$ V para el germanio.

Para cada configuración, se reemplazarán *mentalmente* los diodos por elementos resistivos y se observará la dirección resultante de la corriente, de acuerdo como se establece debido a los voltajes aplicados (“presión”). Si la dirección resultante es “similar” a la flecha del símbolo del diodo, ocurrirá la conducción a través del diodo y el dispositivo estará en estado “encendido”. La descripción anterior depende de que la fuente suministre un voltaje mayor que el voltaje de “encendido” (V_T) de cada diodo.

Si un diodo está en estado “encendido”, se puede colocar una caída de 0.7-V a través del elemento, o dibujar de nuevo la red con el circuito equivalente V_T como se definió en la tabla 2.1. Con el tiempo, probablemente se preferirá incluir la caída de 0.7-V a través de cada diodo en “encendido” y dibujar una línea a través de cada diodo en estado “apagado” o abierto. Inicialmente el método de sustitución se utilizará con el fin de asegurar que se determinen el voltaje y los niveles de corriente adecuados.

El circuito en serie de la figura 2.10, descrito brevemente en la sección 2.2, se necesitará para demostrar la aproximación descrita en los párrafos anteriores. Primero, el estado del diodo se determina de forma mental al reemplazar el diodo con un elemento resistivo, como lo indica la figura 2.11. La dirección resultante de I coincide con la flecha en el símbolo del diodo, y dado que $E > V_T$, el diodo se encuentra en estado “encendido”. Se dibuja de nuevo la red como lo señala la figura 2.12 con el modelo equivalente apropiado para el diodo de silicio con polarización directa. Obsérvese para una futura referencia, que la polaridad de V_D es la misma que la que resultaría si de hecho el diodo fuera un elemento resistivo. El voltaje resultante y los niveles de corriente son los siguientes:

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

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

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

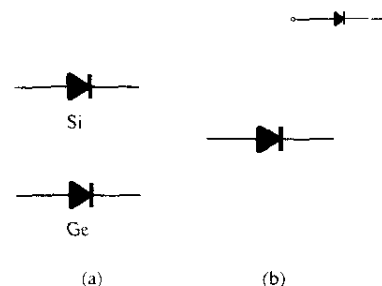


Figura 2.9 a) Notación del modelo aproximado; b) notación del modelo ideal.

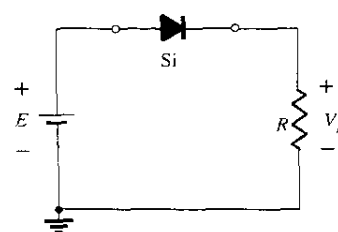


Figura 2.10 Configuración con diodo en serie.

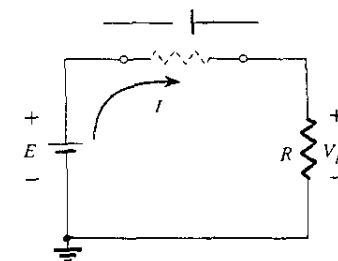


Figura 2.11 Determinación del estado del diodo de la figura 2.10.

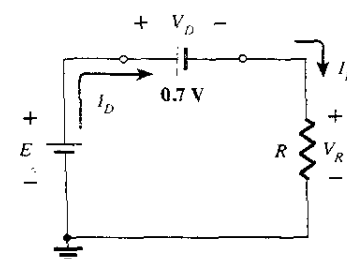


Figura 2.12 Sustitución del modelo equivalente para el diodo en estado “encendido” de la figura 2.10.

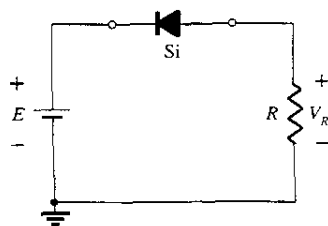


Figura 2.13 Invertiendo el diodo de la figura 2.10.

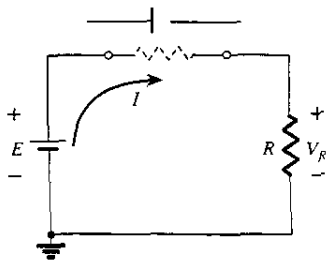


Figura 2.14 Determinación del estado del diodo de la figura 2.13.

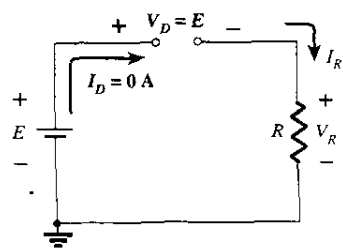


Figura 2.15 Sustitución del modelo equivalente para el diodo en estado "apagado" de la figura 2.13.

En la figura 2.13 el diodo de la figura 2.10 se invirtió. El reemplazo mental del diodo por un elemento resistivo según la figura 2.14 indicará que la dirección resultante de la corriente no coincide con la flecha del símbolo del diodo. El diodo está en estado "apagado", lo que genera el circuito equivalente de la figura 2.15. Debido al circuito abierto, la corriente del diodo es de 0 A y el voltaje a través de la resistencia R es la siguiente:

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

El hecho de que $V_R = 0 \text{ V}$ establecerá E volts a través del circuito abierto, como se definió por la ley de voltaje de Kirchhoff. Siempre se tomará en cuenta que bajo cualesquiera circunstancias, valores instantáneos de dc, ac, pulsos, etc., deberá satisfacerse la ley de voltaje de Kirchhoff.

EJEMPLO 2.6

Para la configuración de diodos en serie de la figura 2.16, determinar V_D , V_R e I_D .

Solución

Debido a que el voltaje establece una corriente en la dirección de las manecillas del reloj para coincidir con la flecha del símbolo y que el diodo está en estado "encendido",

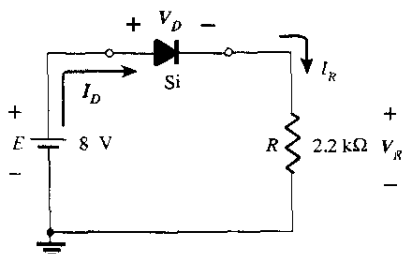


Figura 2.16 Circuito para el ejemplo 2.6.

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

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

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

EJEMPLO 2.7

Repetir el ejemplo 2.6 con el diodo invertido.

Solución

Al eliminar el diodo, resulta que la dirección de I es opuesta a la flecha en el símbolo del diodo, y que el equivalente del diodo es el circuito abierto sin importar qué modelo se utilice. Debido al circuito abierto, el resultado es la red de la figura 2.17, donde $I_D = 0 \text{ A}$. Esto es porque $V_R = I_R R$, $V_R = (0) R = 0 \text{ V}$. Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor del lazo cerrado genera

$$E - V_D - V_R = 0$$

y

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

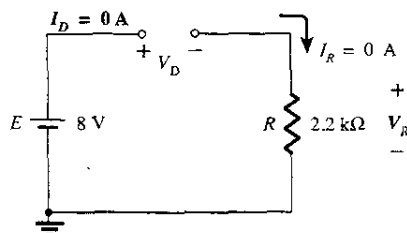


Figura 2.17 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 2.7.

Obsérvese en el ejemplo 2.7 el alto voltaje a través del diodo a pesar de que se encuentra en estado “apagado”. La corriente es cero, pero el voltaje es significativo. Con el fin de repasar, debe recordarse el análisis siguiente:

1. Un circuito abierto puede tener cualquier voltaje a través de sus terminales, pero la corriente siempre será igual a 0 A.
2. Un circuito cerrado tiene una caída de 0 V a través de sus terminales, pero la corriente estará limitada por la red que la rodea.

En el siguiente ejemplo es importante la notación de la figura 2.18 para el voltaje aplicado. Se trata de una notación común en la industria, con la que el lector debe familiarizarse. Dicha notación y otros niveles definidos de voltaje se tratarán con mayor profundidad en el capítulo 4.

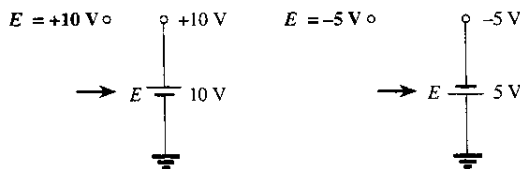


Figura 2.18 Notación de la fuente.

Para la configuración de diodo en serie de la figura 2.19, determinar V_D , V_R e I_D .

EJEMPLO 2.8

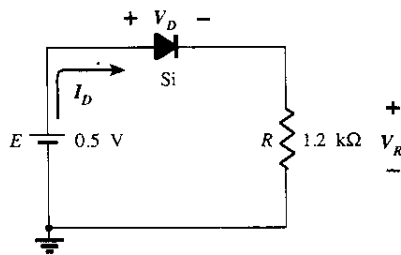


Figura 2.19 Circuito del diodo en serie para el ejemplo 2.8.

Solución

A pesar de que la “presión” establece una corriente con la misma dirección que el símbolo de la flecha, el nivel del voltaje aplicado resulta insuficiente para “encender” el diodo de silicio. El punto de operación sobre las características se señala en la figura 2.20, y establece el equivalente del circuito abierto como la aproximación adecuada. El voltaje resultante y los niveles de corriente son por tanto los siguientes:

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

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

y

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

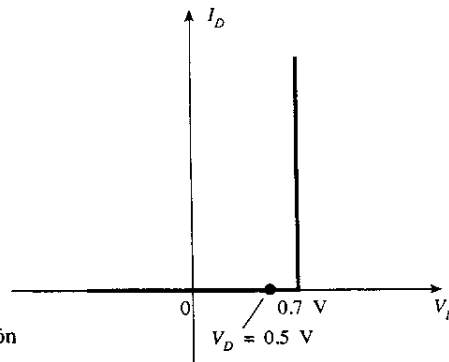


Figura 2.20 Punto de operación con $E = 0.5 \text{ V}$.

EJEMPLO 2.9

Determinar V_o e I_D para el circuito en serie de la figura 2.21.

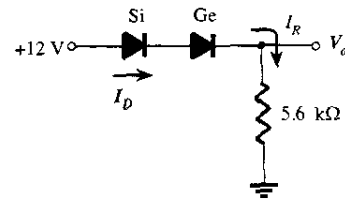


Figura 2.21 Circuito para el ejemplo 2.9.

Solución

Un enfoque similar que se aplicó en la figura 2.6 revelará que la corriente resultante tiene la misma dirección que las flechas de los símbolos de ambos diodos, y que la red de la figura 2.22 es el resultado, porque $E = 12\text{ V} > (0.7\text{ V} + 0.3\text{ V}) = 1\text{ V}$. Nótese la fuente redibujada de 12 V y la polaridad de V_o a través de la resistencia de 5.6 kΩ. El voltaje resultante

$$V_o = E - V_{T_1} - V_{T_2} = 12\text{ V} - 0.7\text{ V} - 0.3\text{ V} = 11\text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_o}{R} = \frac{11\text{ V}}{5.6\text{ k}\Omega} \cong 1.96\text{ mA}$$

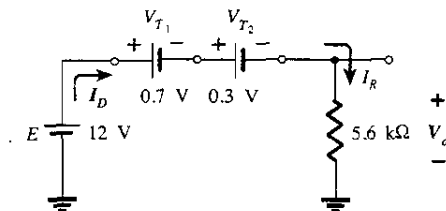


Figura 2.22 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 2.9.

EJEMPLO 2.10

Determinar I_D , V_{D_2} y V_o para el circuito de la figura 2.23.

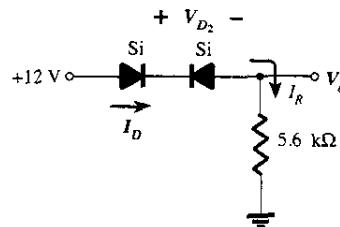


Figura 2.23 Circuito para el ejemplo 2.10.

Solución

Al eliminar los diodos y al determinar la dirección de la corriente resultante I generará el circuito de la figura 2.24. Existe una similitud en la dirección de la corriente para el diodo de silicio, pero no así para el diodo de germanio. La combinación de un corto circuito en serie con un circuito abierto siempre genera como resultado un circuito abierto e $I_D = 0\text{ A}$, como lo señala la figura 2.25.

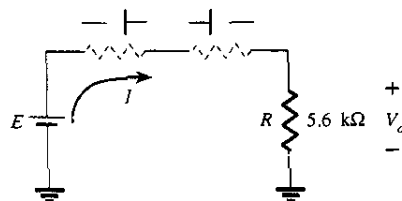


Figura 2.24 Determinación del estado de los diodos de la figura 2.23.

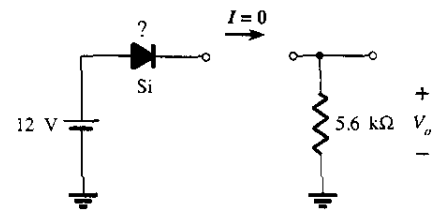


Figura 2.25 Sustitución del estado equivalente para el diodo abierto.

La pregunta que permanece es: ¿qué sustituir en lugar del diodo de silicio? Para el análisis que seguirá y para los capítulos subsiguientes, sólo debe recordarse que para el diodo práctico real $I_D = 0$ A, $V_D = 0$ V (y viceversa), como se describió para la situación sin polarización en el capítulo 1. Las condiciones descritas por $I_D = 0$ A y $V_D = 0$ V se indican en la figura 2.26.

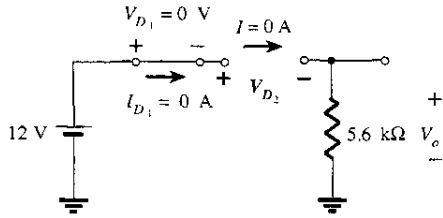


Figura 2.26 Determinación de las cantidades desconocidas para el circuito del ejemplo 2.10.

$$V_o = I_R R = I_D R = (0 \text{ A}) R = 0 \text{ V}$$

y

$$V_{D_2} = V_{\text{circuito abierto}} = E = 12 \text{ V}$$

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj da

$$E - V_{D_1} - V_{D_2} - V_o = 0$$

y

$$V_{D_2} = E - V_{D_1} - V_o = 12 \text{ V} - 0 - 0 = 12 \text{ V}$$

con

$$V_o = 0 \text{ V}$$

Determinar I , V_1 , V_2 y V_o para la configuración de dc en serie de la figura 2.27.

EJEMPLO 2.11

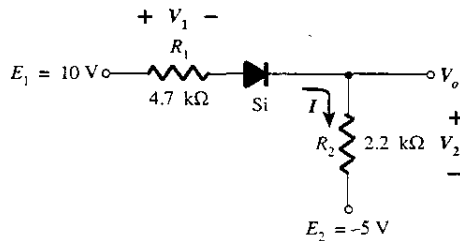


Figura 2.27 Circuito para el ejemplo 2.11.

Solución

Las fuentes se dibujan de nuevo y la dirección de la corriente se indica en la figura 2.28. El diodo está en estado “encendido” y la notación que aparece en la figura 2.29 está incluida para indicar este estado. Obsérvese que el estado “encendido” se anota sólo mediante $V_D = 0.7$ V

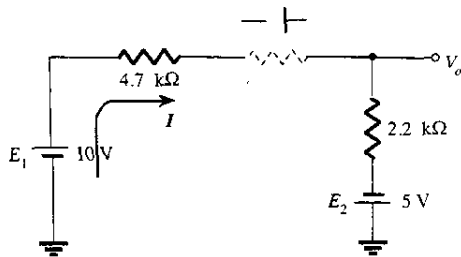


Figura 2.28 Determinación del estado del diodo para la red de la figura 2.27.

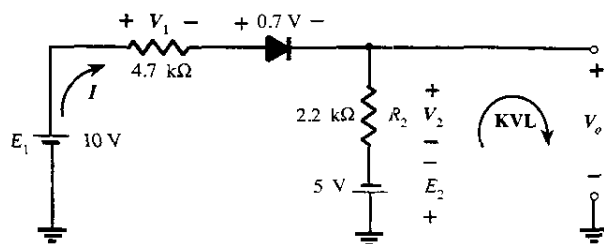


Figura 2.29 Determinación de las cantidades desconocidas para la red de la figura 2.27.

2.4 Configuraciones de diodos en serie con entradas de dc

adicional en la figura. Esto elimina la necesidad de dibujar de nuevo la red y evita cualquier confusión que pueda generarse por la aparición de otra fuente. Como se señaló en la introducción de esta sección, es probable que esta sea la ruta y notación que se tomará, una vez que se establece un nivel de confiabilidad en el análisis de las configuraciones de los diodos. Con el tiempo, el análisis completo se desarrollará sólo refiriéndose a la red original. Recuerde que puede indicarse un diodo con polarización inversa, sólo con una línea a través del 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

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

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

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff a la sección de salida en la dirección de las manecillas del reloj generará un resultado

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

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

El signo de menos indica que V_o tiene una polaridad opuesta a la que aparece en la figura 2.27.

2.5 CONFIGURACIONES EN PARALELO Y EN SERIE-PARALELO

Los métodos aplicados en la sección 2.4 se pueden extender al análisis de las configuraciones en paralelo y en serie-paralelo. Para cada área de aplicación, sólo se igualan las series secuenciales de pasos aplicados a las configuraciones de diodos en serie.

EJEMPLO 2.12

Determinar V_o , I_1 , I_{D_1} e I_{D_2} para la configuración de diodos en paralelo de la figura 2.30.

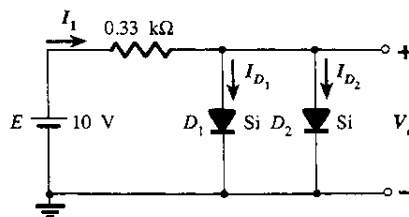


Figura 2.30 Red para el ejemplo 2.12.

Solución

Para el voltaje aplicado, la “presión” de la fuente es para establecer una corriente a través de cada diodo en la misma dirección que se muestra en la figura 2.31. Debido a que la dirección de la corriente resultante es igual a la de la flecha en cada símbolo de diodo, y que el voltaje aplicado es mayor que 0.7 V, ambos diodos están en estado “encendido”. El voltaje a través de los elementos en paralelo es siempre el mismo y

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

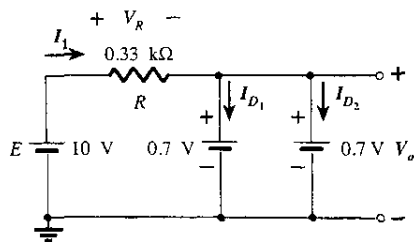


Figura 2.31 Determinación de las cantidades desconocidas para la red del ejemplo 2.12.

La corriente

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

Suponiendo diodos de características similares, se tiene

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

El ejemplo 2.12 demostró una razón para colocar diodos en paralelo. Si la corriente nominal de los diodos de la figura 2.30 es sólo de 20 mA, una corriente de 28.18 mA dañaría el dispositivo si apareciera sólo en la figura 2.30. Al colocar dos en paralelo, la corriente está limitada a un valor seguro de 14.09 mA con el mismo voltaje terminal.

Determinar la corriente I para la red de la figura 2.32.

EJEMPLO 2.13

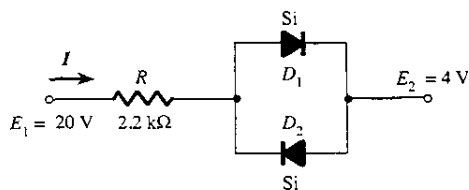


Figura 2.32 Red para el ejemplo 2.13.

Solución

Al dibujar de nuevo la red como lo indica la figura 2.33, se señala que la dirección de la corriente resultante es como para encender el diodo D_1 y apagar el diodo D_2 . La corriente resultante I es entonces

$$I = \frac{E_1 - E_2 - V_D}{R} = \frac{20 \text{ V} - 4 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} \cong 6.95 \text{ mA}$$

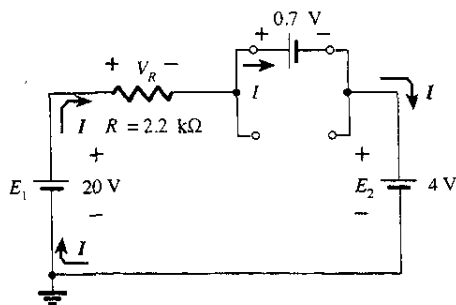


Figura 2.33 Determinación de las cantidades desconocidas para la red del ejemplo 2.13.

EJEMPLO 2.14

Determinar el voltaje V_o para la red de la figura 2.34.

Solución

Inicialmente, parecería que el voltaje aplicado “encenderá” ambos diodos; sin embargo, si ambos están en “encendido”, la caída de 0.7-V a través del diodo de silicio no será igual a los 0.3 V a través del diodo de germanio como se requiere, por el hecho de que el voltaje a través de elementos paralelos debe ser el mismo. La acción resultante se puede explicar sólo con notar que cuando la fuente se enciende incrementará de 0 V a 12 V en un periodo, aunque quizá se podría medir en milisegundos. Durante el incremento en que se establece 0.3 V a través del diodo de germanio, éste “prenderá” y mantendrá un nivel de 0.3 V. El diodo de silicio nunca tendrá la oportunidad de capturar su 0.7 V requerido, y por tanto permanecerá en su estado de circuito abierto como lo indica la figura 2.35. El resultado:

$$V_o = 12 \text{ V} - 0.3 \text{ V} = 11.7 \text{ V}$$

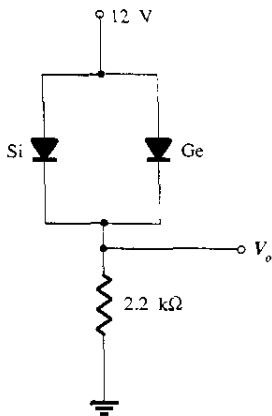


Figura 2.34 Red para el ejemplo 2.14.

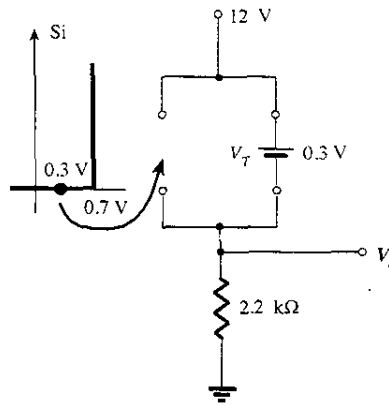


Figura 2.35 Determinación de V_o para la red de la figura 2.34.

EJEMPLO 2.15

Determinar las corrientes I_1 , I_2 e I_{D_2} para la red de la figura 2.36.

Solución

El voltaje aplicado (presión) es como para encender ambos diodos, como se observó por las direcciones de corriente resultante en la red de la figura 2.37. Nótese que el uso de la notación abreviada para los diodos “encendido” y que la solución se obtienen a través de una aplicación de técnicas aplicadas a las redes dc en serie-paralelo.

$$I_1 = \frac{V_{T_2}}{R_1} = \frac{0.7 \text{ V}}{3.3 \text{ k}\Omega} = 0.212 \text{ mA}$$

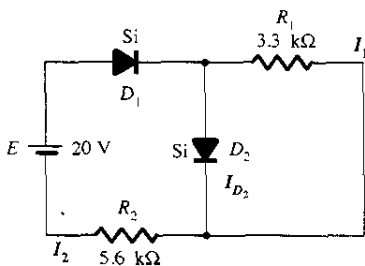


Figura 2.36 Red para el ejemplo 2.15.

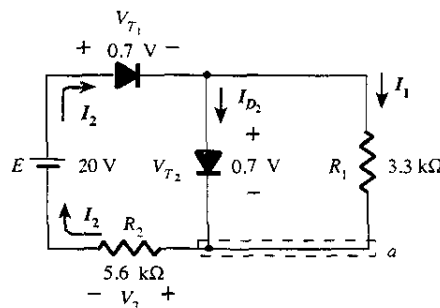


Figura 2.37 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 2.15.

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla indicada en la dirección de las manecillas del reloj produce:

$$-V_2 + E - V_{T_1} - V_{T_2} = 0$$

y

$$V_2 = E - V_{T_1} - V_{T_2} = 20 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 18.6 \text{ V}$$

con

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

En el nodo *a* de la parte inferior

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

y

$$I_{D_2} = I_2 - I_1 = 3.32 \text{ mA} - 0.212 \text{ mA} = 3.108 \text{ mA}$$

2.6 COMPUERTAS AND/OR

Ahora, las herramientas de análisis están a la disposición, y la oportunidad de investigar una configuración de computadora, que demostrará el rango de aplicaciones de este dispositivo relativamente sencillo. El análisis estará limitado a la determinación de los niveles de voltaje, y no se incluirá un análisis detallado de álgebra booleana o de lógica positiva y negativa.

La red que se analizará en el ejemplo 2.16 es una compuerta OR para lógica positiva. Esto es, el nivel de 10-V de la figura 2.38 tiene asignado un "1" para el álgebra booleana, en tanto que una entrada de 0-V tiene asignado un "0". Una compuerta OR es tal, que el nivel de voltaje de salida será de 1 si alguna o ambas entradas son 1. La salida es de 0 si ambas entradas están en el nivel 0.

El análisis de las compuertas AND/OR se realiza con fáciles mediciones al utilizar el equivalente aproximado para un diodo, en lugar del ideal, debido a que puede estipularse que el voltaje a través del diodo debe ser 0.7 V positivos para el diodo de silicio (0.3 V para el de germanio) para cambiar al estado "encendido".

En general, el mejor método es el de establecer un sentido "intuitivo" para el estado de los diodos mediante la observación de la dirección y la "presión" que establecen los potenciales aplicados. El análisis verificará o negará las suposiciones iniciales.

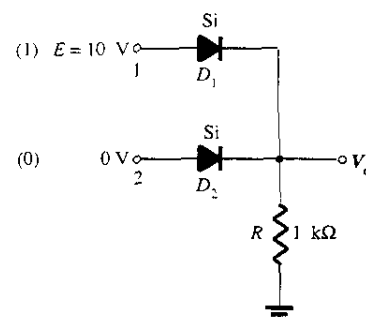


Figura 2.38 Compuerta lógica OR positiva.

Determinar V_o para la red de la figura 2.38.

Solución

Obsérvese que en principio sólo existe un potencial aplicado; 10 V en la terminal 1. La terminal 2 con una entrada de 0 V es esencialmente un potencial de tierra, como se indica en lo que se dibujó de nuevo de la red de la figura 2.39. La figura 2.39 "sugiere" que D_1 está probablemente en estado "encendido" debido a los 10 V aplicados, mientras que D_2 con su lado "positivo" en 0 V está quizá en "apagado". La suposición de estos estados dará por resultado la configuración de la figura 2.40.

El siguiente paso es sólo para verificar que no existen contradicciones en las suposiciones. Esto es, observar que la polaridad a través de D_1 es tal como para encenderlo y que la polaridad a través de D_2 es tal como para apagarlo. Para D_1 el estado "encendido" establece V_o en $V_o = E - V_D = 10 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 9.3 \text{ V}$. Con 9.3 en el lado del cátodo (–) de D_2 y 0 V en el lado del ánodo (+), D_2 está definitivamente en estado "apagado". La dirección de la corriente y la trayectoria continua resultante para la conducción reafirman la suposición de que D_1 está conduciendo. Las suposiciones se confirman por los voltajes y la corriente resultante, y se puede asumir que el análisis inicial es correcto. El nivel de voltaje de salida no es de 10 V como se definió para una entrada de 1, pero el 9.3 V es lo suficientemente grande para ser considerado un nivel 1. Por tanto, la salida es un nivel 1 con sólo una entrada, lo cual sugiere que se trata de una

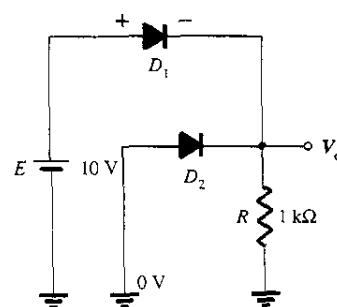


Figura 2.39 Red dibujada de nuevo de la figura 2.38.

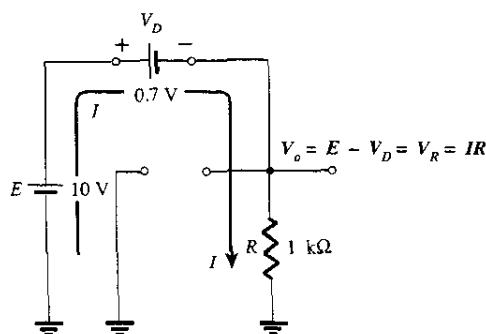


Figura 2.40 Estados del diodo asumidos para la figura 2.38.

compuerta OR. Un análisis de la misma red con dos entradas de 10-V dará por resultado que ambos diodos estén en estado “encendido” y con una salida de 9.3 V. Una entrada de 0-V en ambas entradas, no proporcionará el 0.7 V requerido para encender los diodos y la salida será de 0 debido al nivel de salida de 0-V. Para la red de la figura 2.40 el nivel de corriente se encuentra determinado por

$$I = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9.3 \text{ mA}$$

EJEMPLO 2.17

Determinar el nivel de salida para la compuerta lógica AND positiva de la figura 2.41.

Solución

Obsérvese en este caso que la fuente independiente aparece en la terminal conectada a tierra de la red. Debido a razones que pronto serán obvias, se elige el mismo nivel que el nivel lógico de la entrada. La red está dibujada en la figura 2.42 con las suposiciones iniciales respecto a los estados de los diodos. Con 10 V del lado del cátodo de D_1 se asume que D_1 se encuentra en estado “apagado”, aunque exista una fuente de 10-V conectada al ánodo de D_1 a través de la resistencia. Sin embargo, recuerde que se mencionó en la introducción de esta sección que el empleo del modelo aproximado servirá de ayuda para el análisis. Para D_1 ¿de dónde vendrá el 0.7 V, si los voltajes de entrada y fuente se encuentran en el mismo nivel y creando “presiones” opuestas? Se supone que D_2 se encuentra en estado “encendido” debido al bajo voltaje del lado del cátodo y la disponibilidad de la fuente de 10-V a través de la resistencia de 1-k Ω .

Para la red de la figura 2.42 el voltaje en V_o es de 0.7 V, debido a que el diodo D_2 está polarizado directamente. Con 0.7 V en el ánodo de D_1 y 10 V en el cátodo, D_1 está definitivamente en estado “apagado”. La corriente I tendrá la dirección que se indica en la figura 2.42 y una magnitud igual a

$$I = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 9.3 \text{ mA}$$

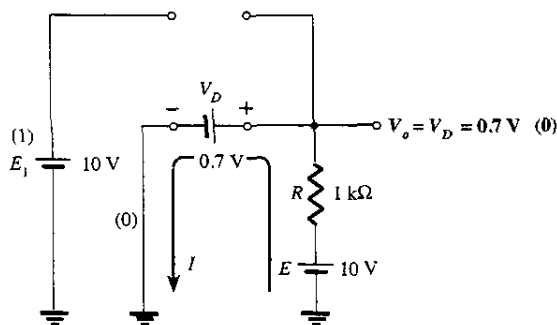


Figura 2.42 Sustitución de los estados asumidos para los diodos de la figura 2.41.

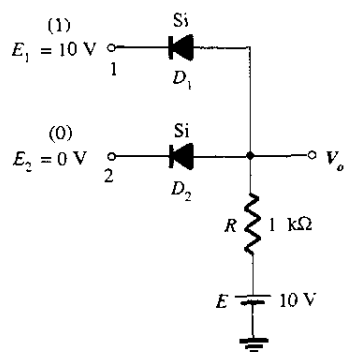


Figura 2.41 Compuerta lógica AND positiva.

El estado de los diodos es, por tanto, confirmado y el análisis anterior fue correcto. A pesar de que no hay 0 V como se especificó antes para el nivel 0, el voltaje de salida es lo suficientemente pequeño para poder considerarlo en un nivel 0. Para la compuerta AND, por tanto, una única entrada dará por resultado un nivel 0 de salida. Los estados restantes de los diodos para las posibilidades de dos entradas y ninguna entrada se examinarán en los problemas que aparecen al final del capítulo.

2.7 ENTRADAS SENOIDALES; RECTIFICACIÓN DE MEDIA ONDA

Ahora, el análisis de los diodos se ampliará para incluir las funciones variables en el tiempo, tales como la forma de onda senoidal y la onda cuadrada. No existe duda de que el grado de dificultad se complicará, pero una vez que se comprendan varios movimientos, el análisis será bastante directo y seguirá un procedimiento común.

La red más simple que se examinará con una señal variable en el tiempo aparece en la figura 2.43. Por el momento se utilizará el modelo ideal (obsérvese la ausencia de la identificación Si o Ge para denotar el diodo ideal), para asegurar que el sistema no se dificulte por la complejidad matemática adicional.

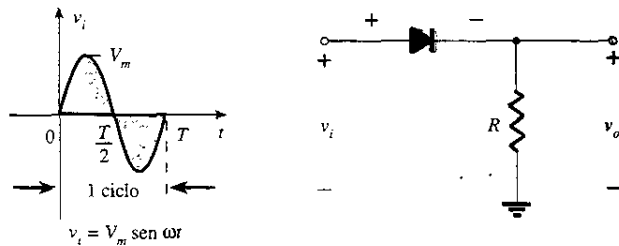


Figura 2.43 Rectificador de media onda.

A través de un ciclo completo, definido por el periodo T de la figura 2.43, el valor promedio (la suma algebraica de las áreas arriba y abajo del eje) es cero. El circuito de la figura 2.43, llamado *rectificador de media onda*, generará una forma de onda v_o , la cual tendrá un valor promedio de uso particular en el proceso de conversión de ac a dc. Cuando un diodo se usa en el proceso de rectificación, es común que se le llame *rectificador*. Sus valores nominales de potencia y corriente son normalmente mucho más altos que los de los diodos que se usan en otras aplicaciones, como en computadoras o sistemas de comunicación.

Durante el intervalo $t = 0 \rightarrow T/2$ en la figura 2.43, la polaridad del voltaje aplicado v_i es como para establecer “presión” en la dirección que se indica, y encender el diodo con la polaridad indicada arriba del diodo. Al sustituir la equivalencia de circuito cerrado por el diodo dará por resultado el circuito equivalente de la figura 2.44, donde parece muy obvio que la señal de salida es una réplica exacta de la señal aplicada. Las dos terminales que definen el voltaje de salida están conectadas directamente a la señal aplicada mediante la equivalencia de corto circuito del diodo.

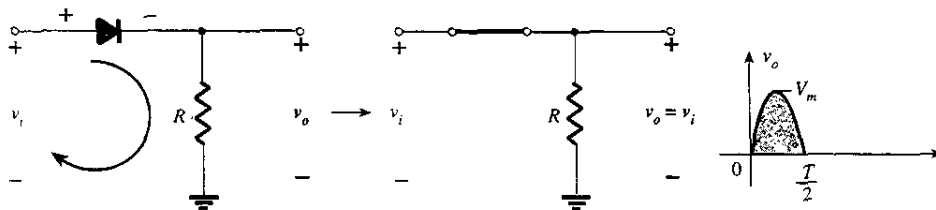


Figura 2.44 Región de conducción ($0 \rightarrow T/2$).

Para el periodo $T/2 \rightarrow T$, la polaridad de la entrada v_i es como se indica en la figura 2.45, y la polaridad resultante a través del diodo ideal produce un estado “apagado” con un equivalente de circuito abierto. El resultado es la ausencia de una trayectoria para el flujo de carga y $v_o = iR = (0)R = 0$ V para el periodo $T/2 \rightarrow T$. La entrada v_i y la salida v_o se dibujaron juntas en la figura 2.46 con el propósito de establecer una comparación. Ahora, la señal de salida v_o tiene un área neta positiva arriba del eje sobre un periodo completo, y un valor promedio determinado por

$$V_{dc} = 0.318V_m \quad \text{media onda} \quad (2.7)$$

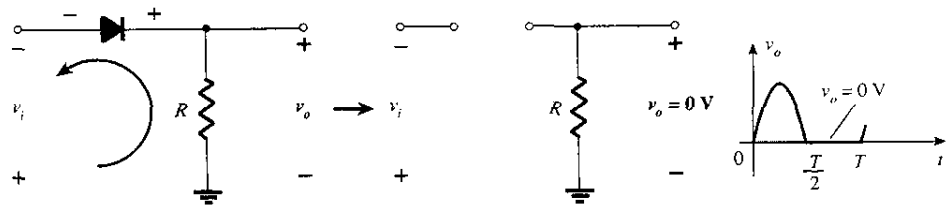


Figura 2.45 Región de no conducción ($T/2 \rightarrow T$).

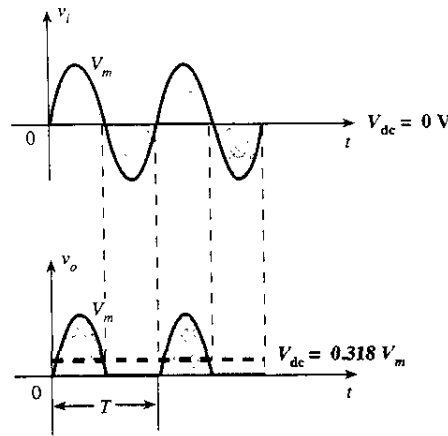


Figura 2.46 Señal rectificada de media onda.

Al proceso de eliminación de la mitad de la señal de entrada para establecer un nivel dc se le llama *rectificación de media onda*.

El efecto del uso de un diodo de silicio con $V_T = 0.7$ V se señala en la figura 2.47 para la región de polarización directa. La señal aplicada debe ser ahora de por lo menos 0.7 V antes de que el diodo pueda “encender”. Para los niveles de v_i menores que 0.7 V el diodo aún está en estado de circuito abierto y $v_o = 0$ V, como lo indica la misma figura. Cuando conduce, la diferencia entre v_o y v_i se encuentra en un nivel fijo de $V_T = 0.7$ V y $v_o = v_i - V_T$, según se indica en la figura. El efecto neto es una reducción en el área arriba del eje, la cual reduce de manera

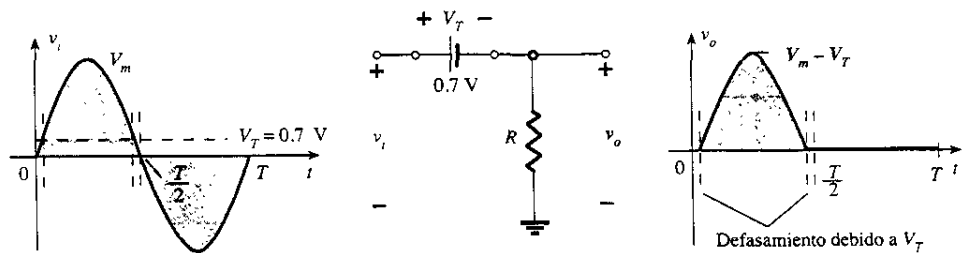


Figura 2.47 Efecto de V_T sobre la señal rectificada de media onda.

natural el nivel resultante de voltaje dc. Para las situaciones donde $V_m \gg V_T$, la ecuación 2.8 puede aplicarse para determinar el valor promedio con un alto nivel de exactitud.

$$V_{dc} \cong 0.318(V_m - V_T) \quad (2.8)$$

Si v_m es suficientemente más grande que V_T , la ecuación 2.7 es a menudo aplicada como una primera aproximación de V_{dc} .

- Dibujar la salida v_o y determinar el nivel dc de la salida de la red de la figura 2.48.
- Repetir el inciso a si el diodo ideal es reemplazado por un diodo de silicio.
- Repetir los incisos a y b si V_m se incrementa a 200 V, y comparar las soluciones utilizando las ecuaciones (2.7) y (2.8).

EJEMPLO 2.18

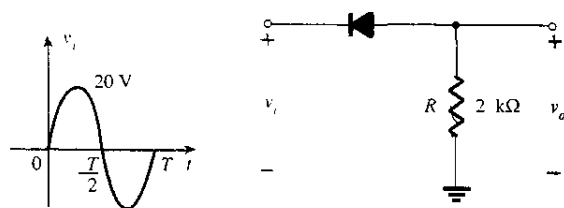


Figura 2.48 Red para el ejemplo 2.18.

Solución

- En esta situación el diodo conducirá durante la parte negativa de la entrada según se muestra en la figura 2.49, y v_o aparecerá como se señala en la misma figura. Para el periodo completo, el nivel dc es

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

El signo negativo indica que la polaridad de la salida es opuesta a la polaridad definida de la figura 2.48.

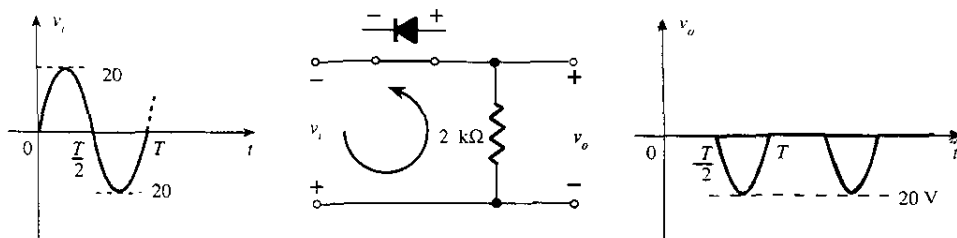


Figura 2.49 v_o resultante para el circuito del ejemplo 2.18.

- Utilizando un diodo de silicio, la salida tiene la apariencia de la figura 2.50 y

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

La caída resultante en el nivel dc es de 0.22 V o cerca del 3.5%.

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

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

la que es una diferencia que, en efecto, puede ignorarse para la mayor parte de las aplicaciones. Para el inciso c el desvío y la caída en la amplitud debido a V_T no sería discernible en un osciloscopio típico si se despliega el patrón completo.

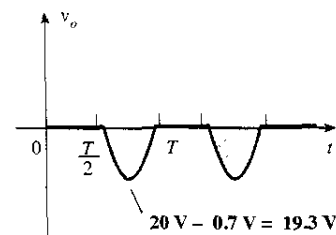


Figura 2.50 Efecto de V_T sobre la salida de la figura 2.49.