

DIODO SEMICONDUCTOR

DIODO IDEAL

El primer dispositivo electrónico que se presentará se denomina diodo. Es el más sencillo de los dispositivos semiconductores pero desempeña un papel vital en los sistemas electrónicos, con sus características que se asemejan, en gran medida a las de un sencillo interruptor.

Antes de examinar la construcción y características de un dispositivo real, consideremos primero un dispositivo ideal, para proporcionar una base comparativa. El diodo ideal es un dispositivo de dos terminales que tiene el símbolo y las características que se muestran en las figuras 7(a) y (b) respectivamente.

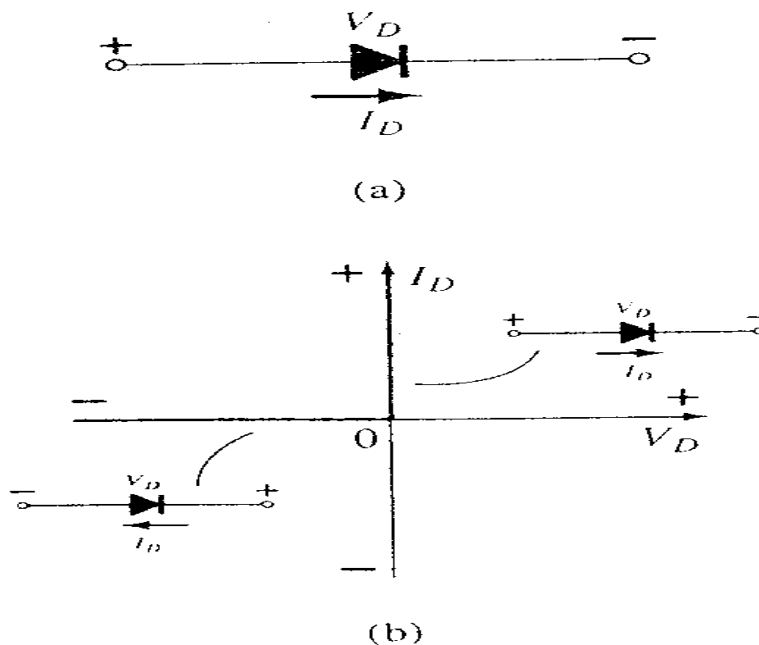


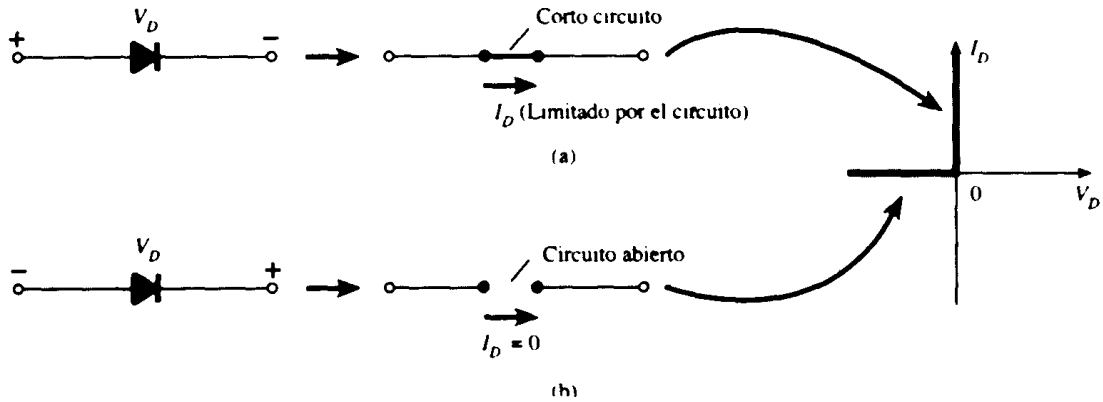
Figura 7 Diodo ideal (a) Símbolo (b) curva característica.

En forma ideal, un diodo conducirá corriente en la dirección definida por la flecha en el símbolo y actuará como un circuito abierto para cualquier intento de establecer corriente en la dirección opuesta. En esencia:

Las características de un diodo ideal son aquellas de un interruptor que puede conducir corriente en una sola dirección.

El diodo ideal es un circuito cerrado para la región de conducción.

El diodo ideal es un circuito abierto para la región de no-conducción.



**Figura 8 Estados de conducción (a) y No-conducción (b) según esta determinado Por la polarización aplicada.
DIODO SEMICONDUCTOR**

El diodo semiconductor se forma uniendo simplemente material n con material p , como se ilustra en la figura 9. En el momento en que dos materiales se “unen”, los electrones y los huecos en la región de la unión se combinarán, dando como resultado una carencia de portadores en la región cercana a la unión.

Esta región de iones negativos y positivos descubiertos recibe el nombre de región de agotamiento por la ausencia de portadores en la misma.

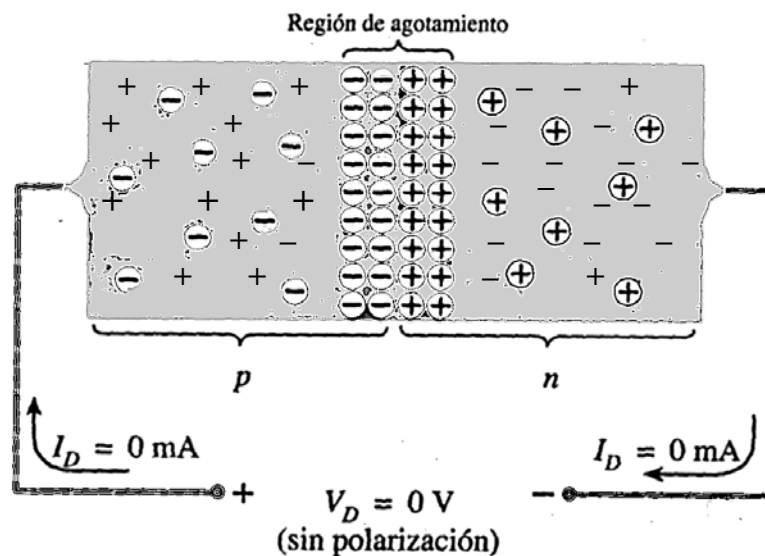


Figura 9 Unión p - n sin polarización externa

Puesto que el diodo es un dispositivo de dos terminales, la aplicación de un voltaje a través de sus terminales implica una de tres posibilidades: no hay polarización ($V_D = 0 \text{ V}$), polarización directa ($V_D > 0 \text{ V}$) y polarización inversa ($V_D < 0 \text{ V}$). Cada una es la condición que se obtendrá en una respuesta que el usuario deberá comprender claramente si desea que el dispositivo sea aplicado con efectividad.

Sin polarización aplicada ($V_D = 0 \text{ V}$)

En condiciones sin polarización figura 9, los portadores minoritarios (huecos) en el material tipo n que se encuentran dentro de la región de agotamiento pasarán directamente al material tipo p . Mientras más cercano se encuentre el portador minoritario a la unión, mayor será la atracción de la capa de iones negativos. Se puede considerar que algo similar sucede con los portadores minoritarios (electrones) del material tipo p . Para propósitos de análisis:

En ausencia de un voltaje de polarización aplicado, el flujo neto de carga en cualquier dirección para un diodo semiconductor es cero.

Condición de polarización inversa ($V_D < 0 \text{ V}$)

Si un potencial externo de V volts se aplica en la unión $p-n$ de manera tal que la terminal positiva esté conectada al material tipo n y la terminal negativa al material tipo p , como se muestra en la figura 10, el número de iones positivos descubiertos en la región de agotamiento del material tipo n aumentará debido al mayor número de electrones “libres” arrastrados hacia el potencial positivo del voltaje aplicado. Por razones similares, el número de iones negativos descubiertos se incrementará en el material tipo p . El efecto neto, en consecuencia, es un ensanchamiento de la región de agotamiento. Dicho ensanchamiento de la región de agotamiento establecerá una barrera demasiado grande como para que los portadores mayoritarios puedan superarla, reduciendo efectivamente el flujo de los mismos a cero como se muestra en la figura 10.

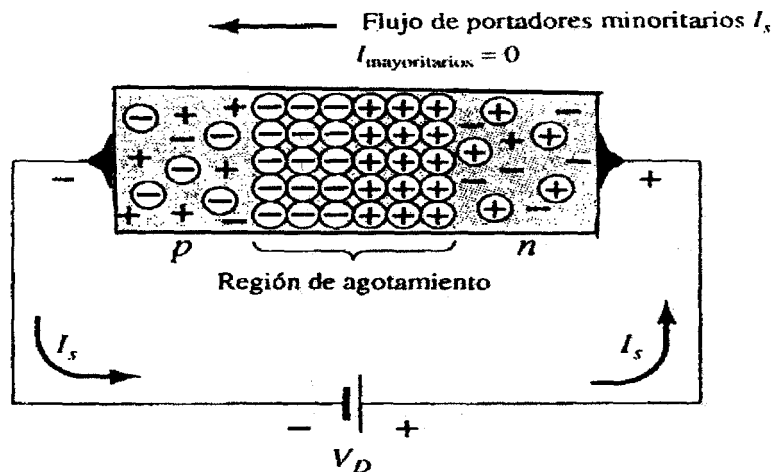


Figura 10 Unión $p-n$ polarizada inversamente

Sin embargo el número de portadores minoritarios que están entrando en la región de agotamiento dan como resultado un flujo de portadores minoritarios.

La corriente que existe bajo condiciones de polarización inversa se denomina corriente de saturación inversa, y se representa mediante I_s .

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

Una condición de polarización directa o de encendido se establece aplicando el potencial positivo al material tipo p y el potencial negativo al material tipo n , como se indica en la figura 11. Por lo tanto, para referencias futuras. Un diodo semiconductor está polarizado directamente cuando se ha establecido la asociación entre tipo p y positivo de la fuente de alimentación, así como entre tipo n y negativo.

La aplicación de un potencial de polarización directa V_D “presionará” a los electrones en el material tipo n y a los huecos en el material tipo p , para recombinar con los iones cerca de la frontera y reducir la anchura de la región de agotamiento, como se muestra en la figura 11. Pero la reducción en la anchura de la región de agotamiento resulta en un denso flujo de portadores mayoritario a través de la unión.

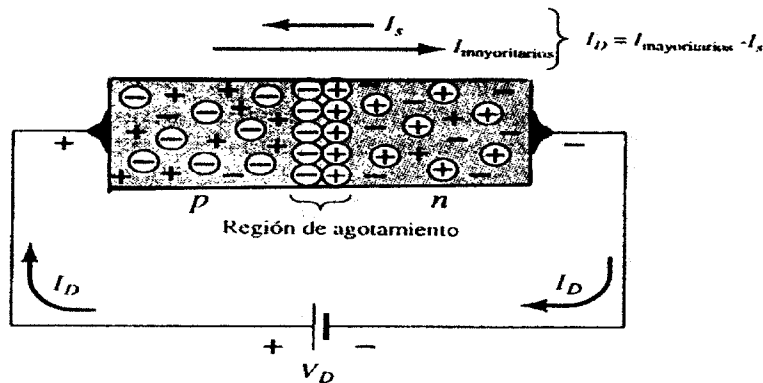


Figura 11 Unión p - n directamente polarizada.

Como la polarización aplicada se incrementa en magnitud, la región de agotamiento continuará disminuyendo su anchura hasta que un desbordamiento de electrones pueda pasar a través de la unión, resultando un incremento exponencial en la corriente, como se ilustra en la región de polarización directa de las características en la figura 12.

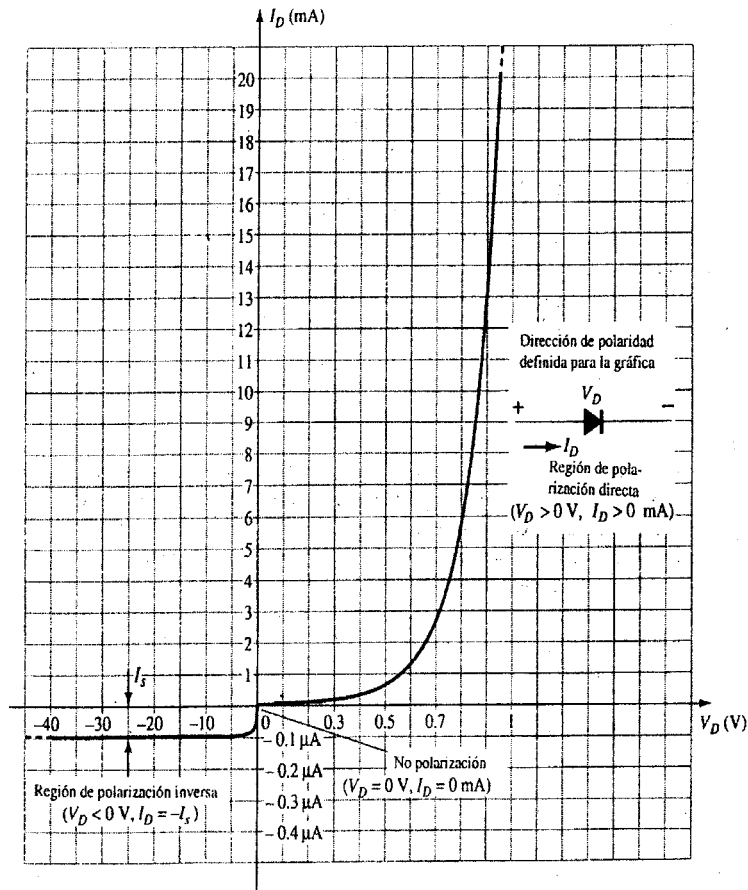


Figura 12 Curva característica del diodo semiconductor

Región Zener

Aun cuando la escala de la figura 12 está en decenas de volts en la región negativa, existe un punto donde la aplicación de un voltaje demasiado negativo dará como resultado un brusco cambio en las características, como se ilustra en la figura 13. La corriente se incrementa en una proporción muy rápida en dirección opuesta a la de la región de voltaje positivo. El potencial de polarización inversa que resulta de este dramático cambio en las características se denomina potencial Zener y se le asigna el símbolo V_z . La región de avalancha (V_z) puede trasladarse muy cerca del eje vertical incrementando los niveles de dopado. El máximo voltaje de polarización inversa que puede aplicarse a un diodo zener antes de entrar en la región zener se denomina voltaje de pico inverso.

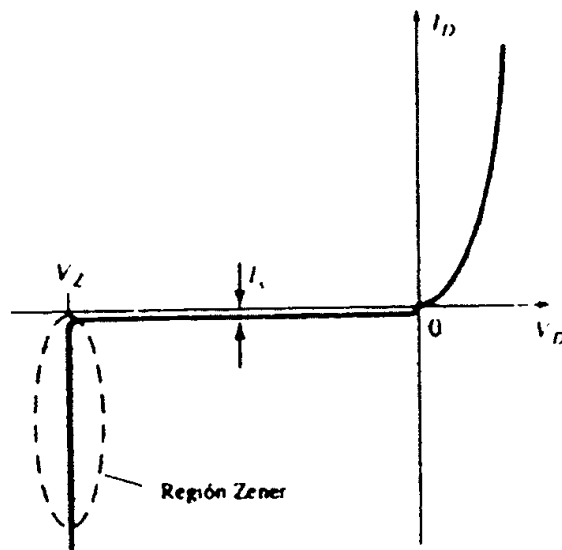


Figura 13 Región Zener.

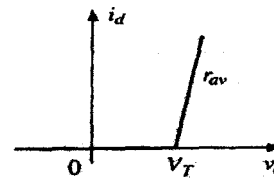
Circuitos equivalentes para diodos

Un circuito equivalente es una combinación de elementos que se eligen en forma adecuada para representar, lo mejor posible, las características terminales reales de un dispositivo o sistema en una región de operación en particular.

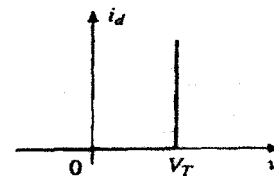
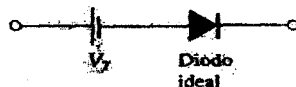
En otras palabras, una vez que se define un circuito equivalente, el símbolo del dispositivo puede eliminarse de un esquema, e insertar el circuito equivalente en su lugar sin afectaren forma severa el comportamiento real del sistema. La figura 14 muestra una tabla de circuitos equivalentes para diodos.

De acuerdo a la figura 14 el voltaje V_T es 0.7 V, la resistencia r_{av} es la reistencia promedio del diodo en conducción generalmente alrededor de 10Ω . Con lo anterior es común que cuando analizamos circuitos con diodos regularmente nos quedamos con el circuito equivalente ideal. Para algunos análisis no debemos olvidar que V_T tiene un valor de 0.7 V para el silicio y que para el germanio es de 0.3 V. Actualmente la gran mayoría de los semiconductores son de silicio.

Modelo de segmentos lineales



Modelo Simplificado $R_{red} \gg r_{av}$



Modelo Ideal $R_{red} \gg r_{av}$
 $E_{red} \gg V_T$

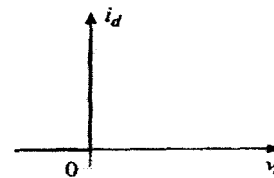


Figura 14 Tabla de los circuitos equivalentes del diodo

PRUEBA DE DIODOS

La condición de un diodo semiconductor puede determinarse rápidamente mediante el empleo de 1) un multímetro digital (MMD) con una función de verificación de diodos, 2) el multímetro en su modalidad de medidor de resistencias (ohmímetro), o 3) un trazador de curvas.

Función de verificación de diodos

Un multímetro digital con capacidad para verificar diodos. Cuando se coloca en esta posición y se hacen las conexiones como se ilustra en la figura 15(a), el diodo deberá estar en el estado “activo” y la pantalla propocionará una indicación del voltaje de polarización directa como, por ejemplo, de 0.67 V.

Una indicación de OL con la conexión de la figura 15(a), revela un diodo abierto (defectuoso).

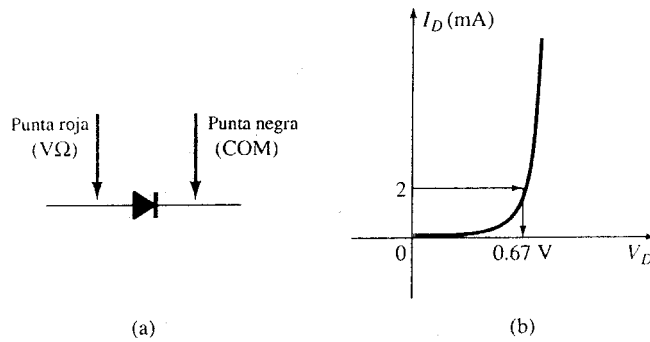


Figura 15 Verificación de un diodo en el estado de polarización directa con un multímetro digital

Prueba de la resistencia (óhmetro)

Si medimos la resistencia de un diodo aplicando las conexiones indicadas en la figura 16(a), podemos esperar un nivel relativamente bajo. La indicación resultante en un óhmetro será una función de la corriente establecida a través del diodo por la batería interna del multímetro. Cuanto más alta sea la corriente, tanto menor será el nivel de la resistencia. Para la situación de polarización inversa, la lectura sería bastante alta, requiriéndose una mayor escala de resistencia en el medidor, como se muestra en la figura 16(b). Una lectura alta de resistencia en ambas direcciones indica, obviamente, una condición abierta (de dispositivo defectuoso), mientras que una lectura de muy baja resistencia en ambas direcciones probablemente señalará un dispositivo en corto.

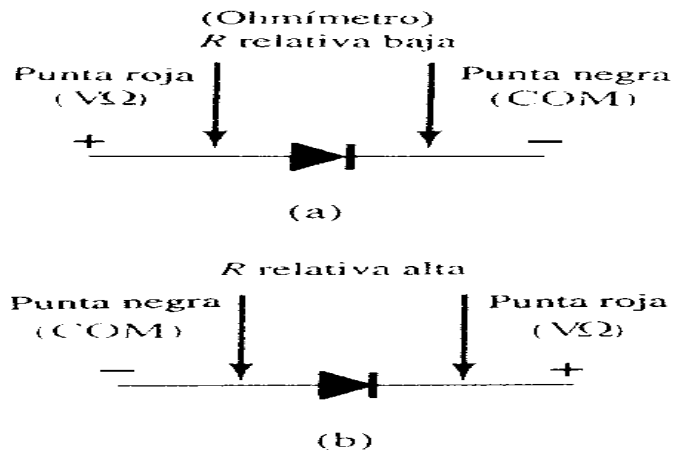


Figura 16 Verificación de un diodo con un óhmetro.

DIODOS ZENER

La Región Zener de la figura 17. Se trato con algún detalle anteriormente. Las características descienden de manera casi vertical al potencial de polarización inversa denominado V_Z . El hecho de que la curva decaiga tan bajo y lejos del eje horizontal en lugar de hacerlo en dirección opuesta hacia la región positiva de V_D , revela que la corriente en la región Zener tiene una dirección opuesta a la de un diodo polarizado directamente.

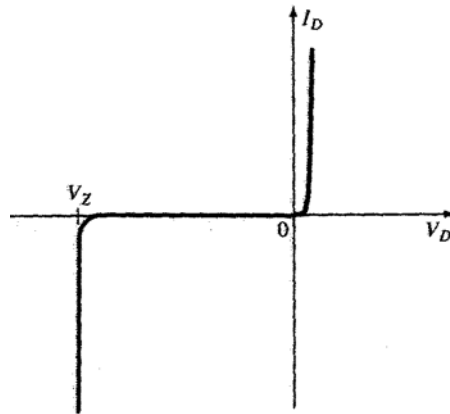
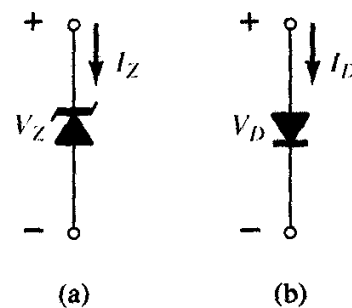


Figura 17 Revisión de la región de Zener

Esta región de características únicas se emplea en el diseño de diodos Zener los cuales se representan con el símbolo gráfico que aparece en la figura 18(a). Tanto el diodo semiconductor como el diodo Zener se presentan uno al lado del otro en la figura 18, para asegurar que la dirección de conducción de cada uno se comprende con claridad junto con la polaridad requerida del voltaje aplicado. Para el diodo semiconductor, el estado “activo” o de “encendido” mantendrá una corriente en la dirección de la flecha del símbolo. Para el diodo Zener, la dirección de conducción es opuesta a la de la flecha en el símbolo. Nótese también que la polaridad de V_D y V_Z es la misma que se obtendría si cada uno fuera un elemento resistivo. La ubicación de la región Zener puede controlarse variando los niveles de dopado. Un incremento en el dopado que produce un aumento en el número de impurezas agregadas, disminuirá el potencial Zener. Los diodos Zener se obtienen con potenciales Zener de 12 a 200 V y valores nominales de potencia de $\frac{1}{4}$ a 50 W. Debido a su más alta temperatura y a su capacidad de corriente, suele preferirse el silicio en la fabricación de los diodos Zener.

Figura 18 Dirección de conducción
(a) Diodo Zener (b) Diodo semiconductor



El circuito equivalente completo del diodo zener en la región del mismo nombre incluye una pequeña resistencia dinámica y una batería de cd igual al potencial zener, como se ilustra en la figura 19. Sin embargo, es un hecho que las resistencias externas tienen un valor mayor que la resistencia equivalente del zener y que el circuito equivalente es simplemente el de la figura 19 (b). Tomando en cuenta lo anterior es un hecho que el zener trabaja en polarización inversa y con su circuito equivalente el uso del zener será como **regulador de voltaje**. Esto lo notamos en su característica donde la región zener es una línea vertical lo que nos dice que el voltaje es una constante.

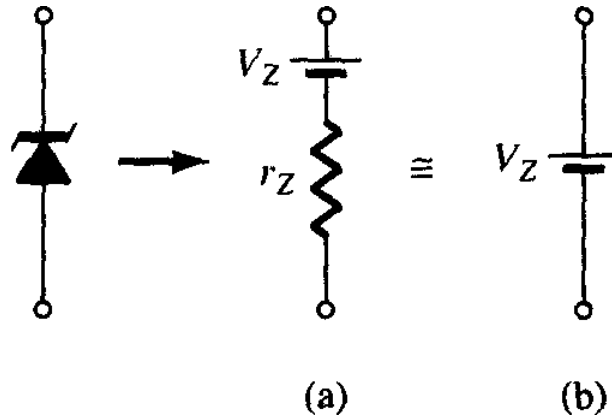


Figura 19 Circuito equivalente del zener (a) Completo (b) Aproximado

APLICACIONES DEL DIODO

INTRODUCCUON

Anteriormente se presentaron la construcción, las características y modelos de los diodos semiconductores. Ahora el objetivo principal es desarrollar un conocimiento práctico del diodo en una diversidad de configuraciones.

RECTIFICACION DE MEDIA ONDA

La red más simple que puede examinarse con una señal variable en el tiempo aparece en la Figura 20.

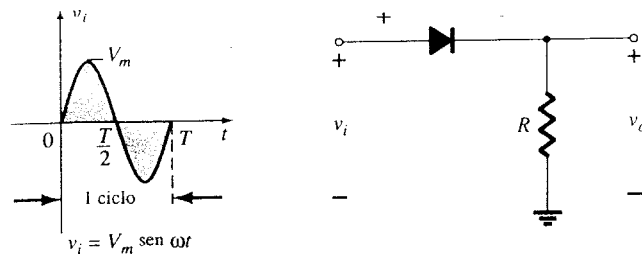


Figura 20 Rectificador de media onda.

En un ciclo completo, definido por el periodo T , el valor promedio (la suma algebraica de las áreas sobre y debajo del eje) es cero. El circuito de la Figura 20, llamado rectificador de media onda, generará una forma de onda V_o que tendrá un valor promedio de empleo particular en el proceso de conversión de ca a cd.

Cuando un diodo se emplea en el proceso de rectificación, se refiere a él comúnmente como a un rectificador.

Durante el intervalo $T = 0 \rightarrow T/2$ en la Figura 20, la polaridad del voltaje aplicado V_i está dado de tal modo que establezca “presión” en la dirección indicada y active al diodo con la polaridad que aparece encima de él. Sustituyendo la equivalencia de corto circuito para el diodo ideal, se obtendrá el circuito equivalente de la Figura 21, donde es claramente obvio que la señal de salida es una réplica exacta de la señal aplicada.

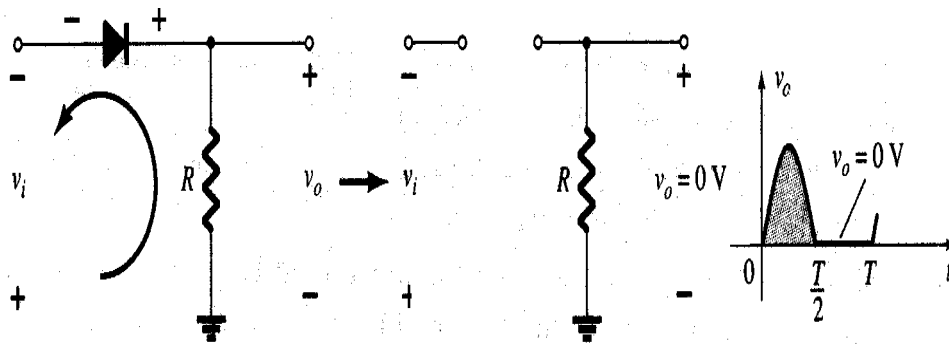


Figura 21 Región de conducción ($T=0 \rightarrow T/2$)

En el periodo $T/2 \rightarrow T$, la polaridad de la entrada V_i se muestra en la figura 22 y la polaridad resultante en el diodo ideal produce un estado “apagado” con un equivalente en circuito abierto

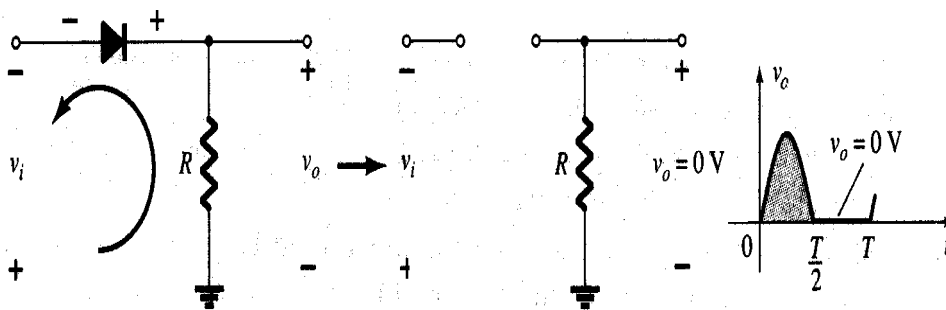


Figura 22 Región de no-conducción ($T/2 \rightarrow T$)

La señal de salida V_o tiene un área positiva neta sobre el eje con respecto a un período completo, como se muestra en la figura 23, así como un valor promedio determinado por:

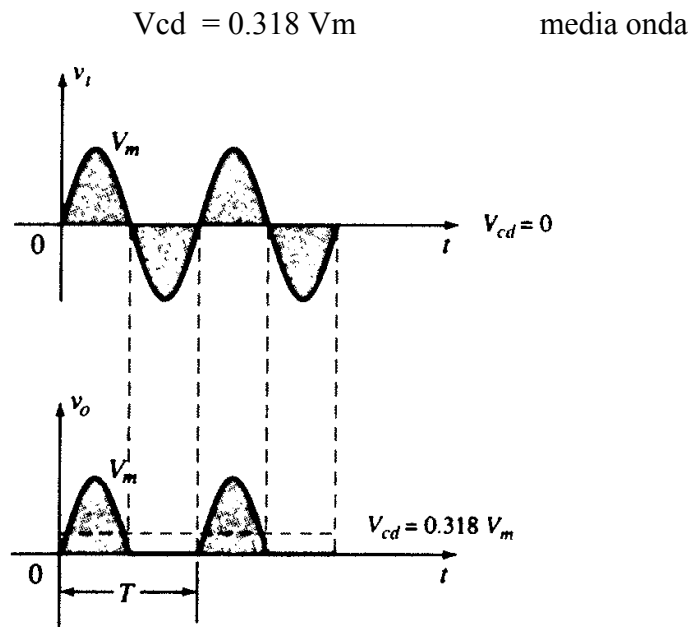


Figura 23 Señales del rectificador de media onda

El proceso de la separación de una mitad de la señal para establecer un nivel de cd recibe con toda propiedad el nombre de rectificación de media onda. El efecto de utilización de un diodo de silicio con $V_T = 0.7 \text{ V}$ se demuestra en la Figura 24 para la región de polarización directa. La señal aplicada debe ser en este caso al menos de 0.7 V antes de que el diodo pueda encenderse.

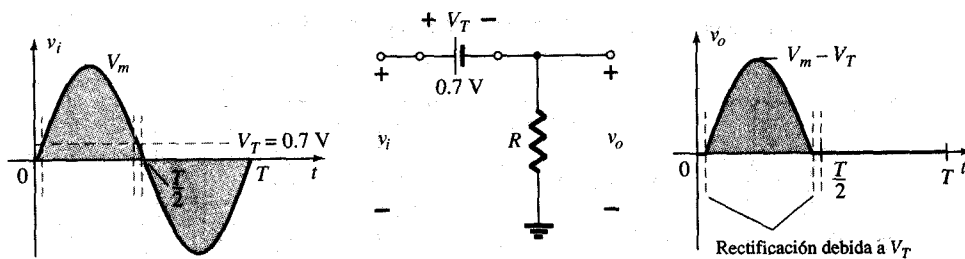


Figura 24 Efecto de V_T en el rectificador de media onda

RECTIFICACION DE ONDA COMPLETO

Red Puente

El nivel de cd directa obtenido a partir de la entrada senoidal puede mejorarse en un 100% empleando un proceso denominado rectificación de onda completa. La red más familiar para efectuar dicha función aparece en la Figura 25, con sus cuatro diodos en una configuración puente. Durante el período $T = 0 \rightarrow T/2$ la polaridad de la entrada se muestra en la Figura 26. También en la Figura 26 se muestran las polaridades resultantes en los diodos ideales para descubrir que D_2 y D_3 conducen, en tanto que D_1 y D_4 se encuentran en el estado "de corte". El resultado neto es la configuración de la Figura 27 con la polaridad y la corriente en R indicada. Como los diodos son ideales, el voltaje de carga es $V_o = V_i$, como se muestra en la figura 27.

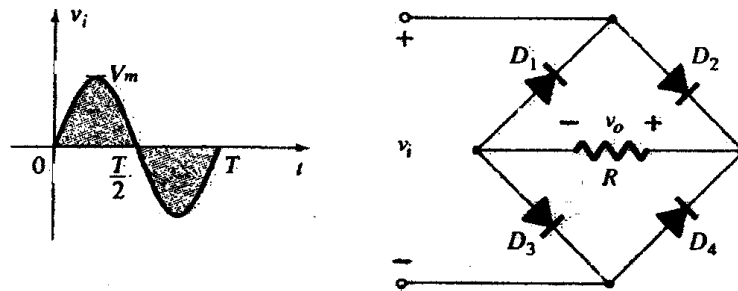


Figura 25 Rectificado puente de onda completa.

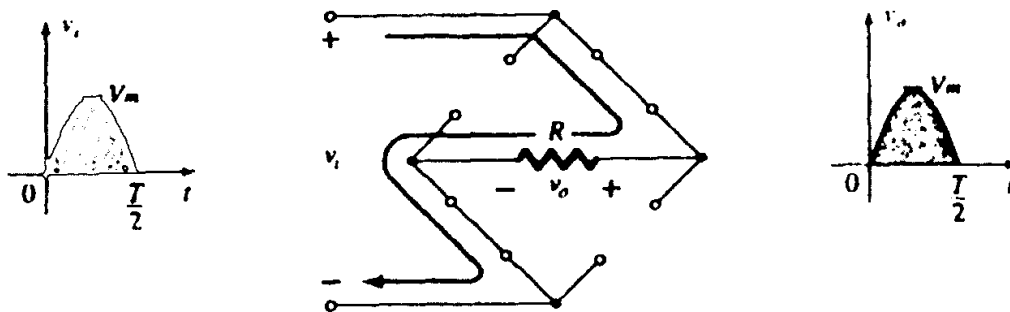
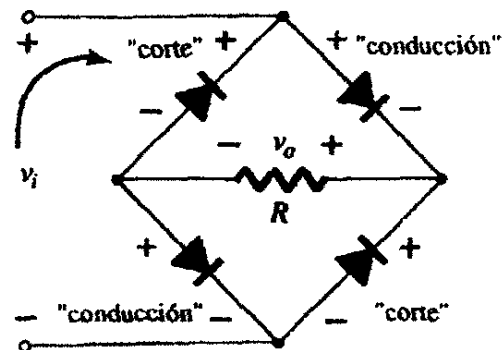


Figura 26 Rectificador de onda completa tipo puente para el periodo $T = 0 \rightarrow T/2$ del voltaje de entrada V_i .

Figura 27 Trayectoria de conducción para la región positiva de V_i .



La región negativa de la entrada, los diodos que conducen son D_1 y D_4 , lo que produce la configuración de la Figura 28. El resultado importante es que la polaridad en el resistor de carga R es la misma que en la Figura 26, estableciendo un segundo pulso positivo, como se ilustra en la Figura 28. Durante un ciclo completo los voltajes de entrada y salida aparecerán como se presenta en la Figura 29.

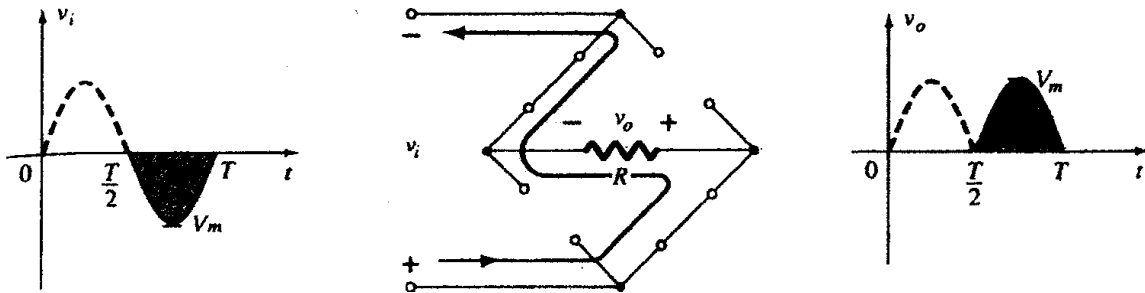


Figura 28 Trayectoria de conducción para la región negativa de V_i .

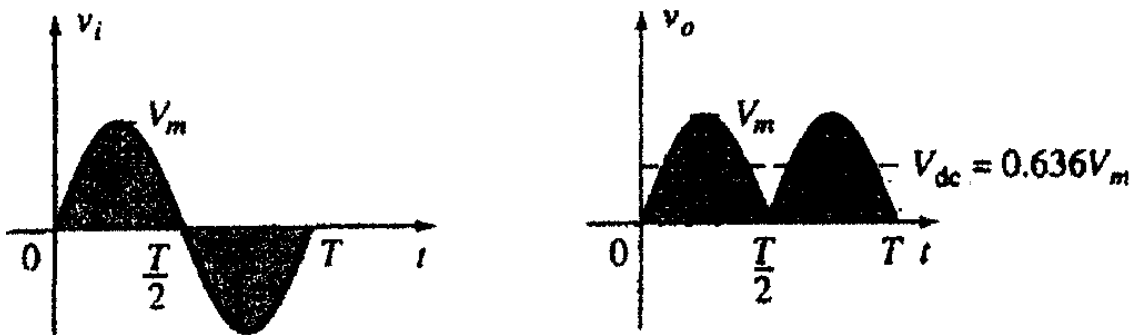


Figura 29 Formas de onda de entrada y salida para un rectificador de onda completa.

Puesto que el área sobre el eje para un ciclo completo es en este caso el doble de la obtenida para el sistema de media onda, el nivel de cd también se ha duplicado y

$$V_{cd} = 2(0.318V_m)$$

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

Red con transformador con derivación central (TAP CENTRAL)

Un segundo rectificador común de onda completa aparece en la Figura 30 con sólo dos diodos, pero requiere un transformador con derivación central (TAP CENTRAL) para establecer la señal de entrada entre cada sección del secundario del transformador. Durante la parte positiva V_i aplicado al primario del transformador, la red será como se indica en la Figura 31. D_1 asume el equivalente en corto circuito y D_2 el equivalente en circuito abierto,

de acuerdo con los voltajes en el secundario y las direcciones de las corrientes resultantes. El voltaje de salida es como se indica en la Figura 31.

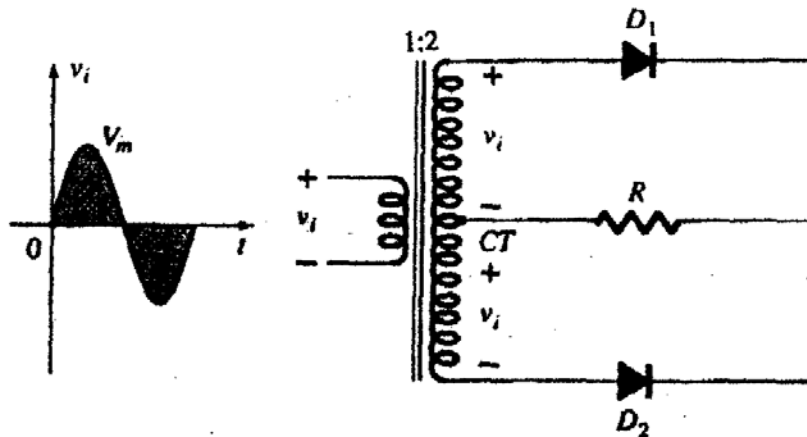


Figura 30 Rectificador de onda completa con transformador con tap central

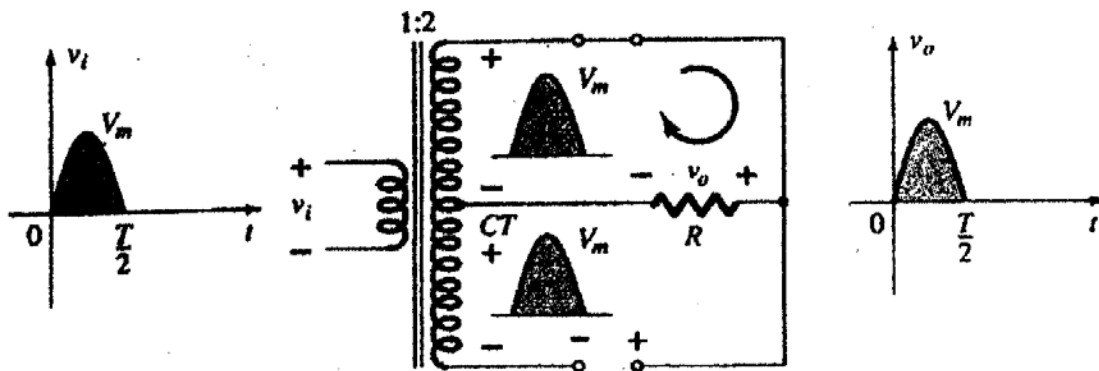


Figura 31 Condiciones de la red para la región positiva de V_i .

Durante la parte negativa de la entrada, la red aparece como su muestra en la Figura 32 invirtiendo los papeles de los diodos, pero manteniendo la misma polaridad para el voltaje en el resistor de carga R . El efecto neto es la misma salida que la que aparece en la Figura 29 con los mismos niveles de cd . Al comparar los dos tipos de rectificadores de onda completa nos damos cuenta que, para que el voltaje de salida sea igual en ambos se requiere, que el transformador del de tap central tenga una relación de vueltas 1:2 comparado con uno que alimente a un rectificador tipo puente.

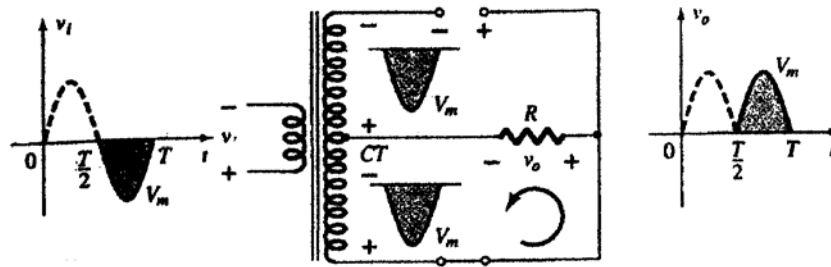


Figura 32 Condiciones de la red para la región negativa de V_i .

Recortadores

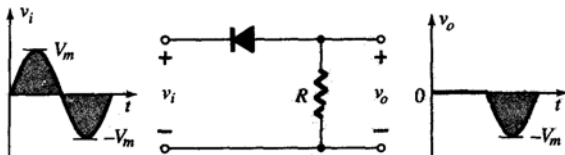
Existe una variedad de redes de diodos denominados recortadores que tienen la capacidad para “recortar” una parte de la señal de la entrada, sin distorsionar la parte restante de la forma de onda alterna. El rectificador de media onda ejemplo de la forma más sencilla.

Dependiendo de la orientación del diodo, se “recorta” la región positiva o negativa de la señal de entrada.

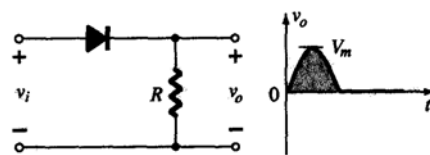
Son dos las categorías generales de los recortadores, en serie y en paralelo. La configuración en serie se define como aquella donde el diodo está en serie con la carga, en tanto que la variedad en paralelo tiene el diodo en una rama paralela a la carga. La figura 33 muestra un resumen de recortadores en serie, y la 34 de recortadores en paralelo.

Recortadores simples en serie (diodos ideales)

POSITIVO



NEGATIVO



Recortadores polarizados en serie (diodos ideales)

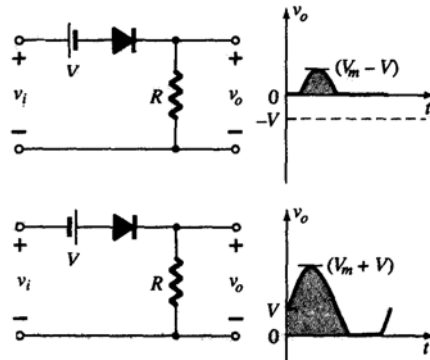
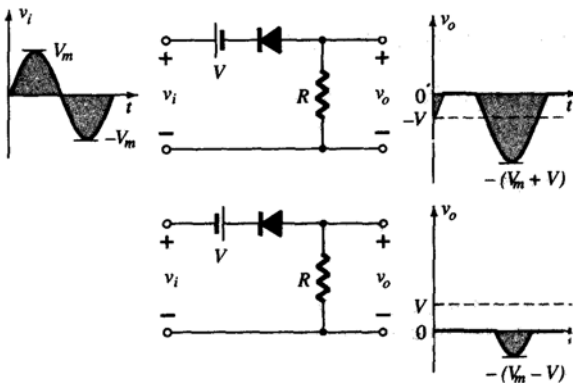
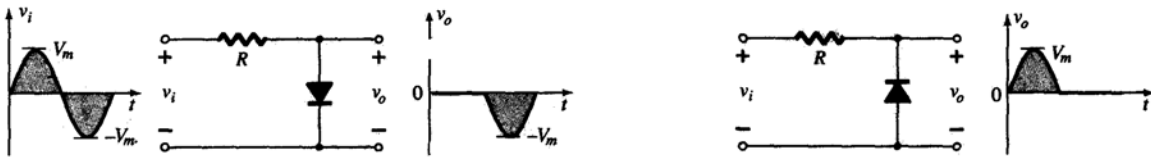


Figura 33 Recortadores en serie

Recortadores simples en paralelo (diodos ideales)



Recortadores polarizados en paralelo (diodos ideales)

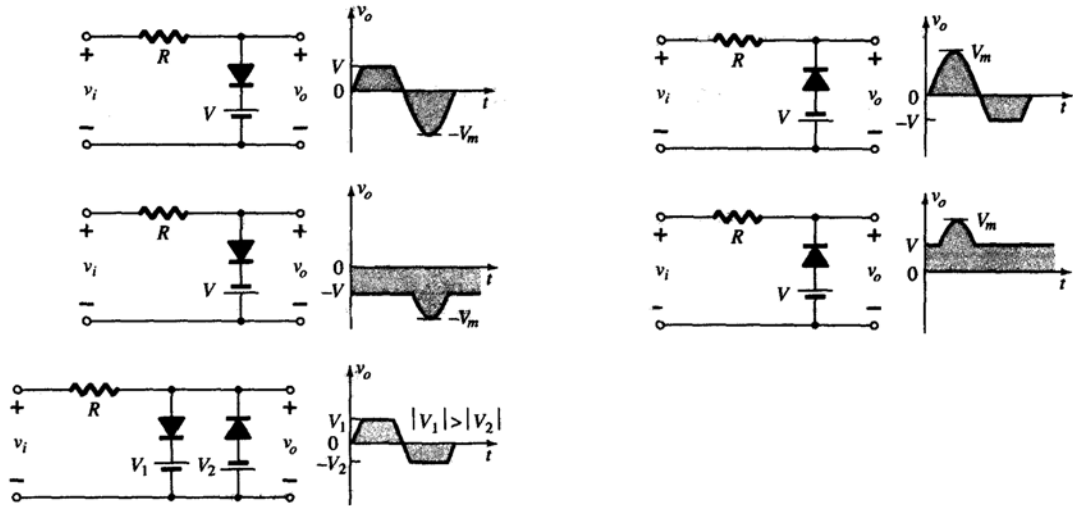


Figura 34 recortadores en paralelo

DIODO ZENER

En el análisis de redes con diodo zener, primero debe determinarse el estado del diodo seguido por su sustitución del modelo apropiado y por una determinación de las otras cantidades desconocidas de la red. A menos que se especifique otra cosa, el modelo zener a utilizarse para el estado de conducción será como el que se ilustra en la figura 35 (a). Para el estado de no-conducción definido por un voltaje menor que V_z pero mayor que 0 v y con la polaridad indicada será el de la figura 35 (b).

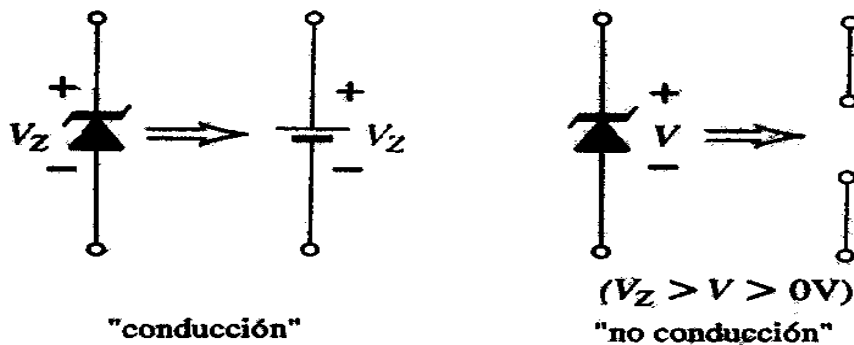


Figura 35 circuitos equivalentes del zener para (a) Conducción (b) No-conducción.

La más conocida de las redes con diodo zener se presenta en la figura 36. El voltaje cd aplicado está fijo, al igual que está el resistor de carga. El análisis puede dividirse fundamentalmente en dos pasos.

1.- *Determinese el estado del diodo zener extrayéndolo del circuito y calculando el voltaje a lo largo del circuito abierto resultante.*

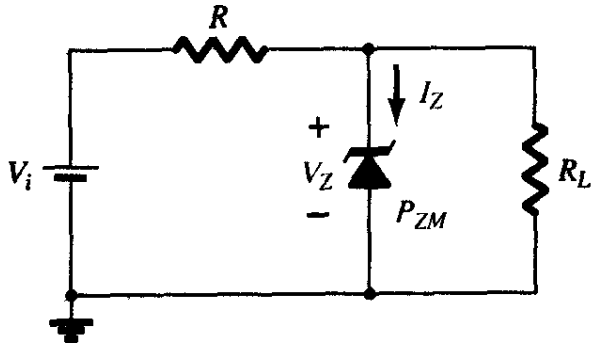


Figura 36 Regulador básico con zener

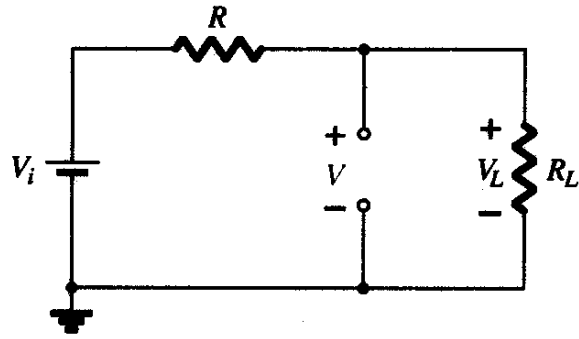


Figura 37 Determinación de estado del diodo zener

Aplicando el paso 1 a la red de la figura 36 se obtendrá la red de la figura 37, donde haciendo de la regla del divisor de voltaje resultará:

$$V = V_L = R_L V_i / R + R_L$$

Si $V \geq V_Z$ el diodo zener estará en estado de conducción y el modelo equivalente de la figura 35(a) puede sustituirse aquí. Si $V < V_Z$ el diodo está en estado de no-conducción y la equivalencia del circuito abierto de la figura 35(b) ocupa el lugar del diodo.

2.- *Sustitúyase el circuito equivalente apropiado y resuélvase para las incógnitas deseadas.*

Para la red de la figura 36 el estado de conducción resultará en la red de la figura 38. Ya que los voltajes a través de los elementos en paralelo deben ser los mismos, encontramos que:

$$V_L = V_Z$$

La corriente en el diodo zener debe determinarse mediante la aplicación de la ley de las corrientes de Kirchhoff. Esto es:

$$I_R = I_Z + I_L$$

Donde

$$I_L = V_L / R_L \quad \text{e} \quad I_R = V_R / R = (V_i - V_L) / R$$

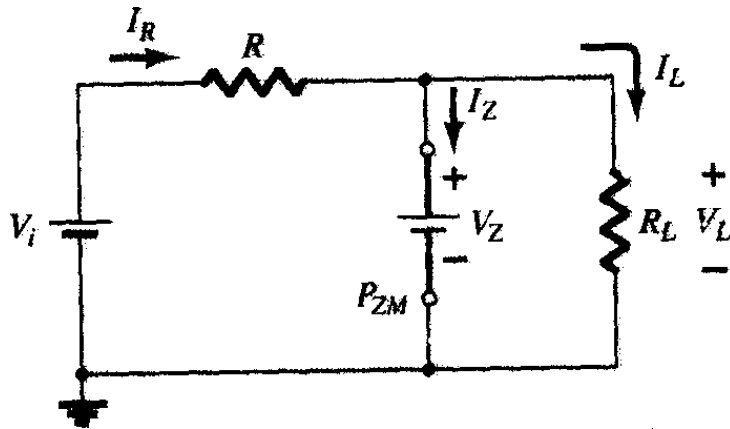


Figura 38 Sustitución del diodo zener para “conducción”

Cuando se activa el sistema, el diodo zener entrara en estado de conducción tan pronto como el voltaje a través del zener sea de V_Z volts. Luego se fijara a este nivel un nivel mayor a este valor.

Los diodos zener se utilizan con más frecuencia en redes de **regulador** o como un voltaje de **referencia**. La figura 36 es un regulador simple diseñado para mantener un voltaje fijo a través de la carga R_L . Con valores de voltaje aplicado mayores que el requerido para poner al diodo zener en estado de conducción, el voltaje a través de la carga se mantendrá en V_Z volts. Si el diodo zener se usa como un voltaje de referencia, proporcionará un nivel para compararlo con otros voltajes. Esta red es un ejemplo de las redes que se usan para crear reguladores con diodo zener, existen redes más complejas.