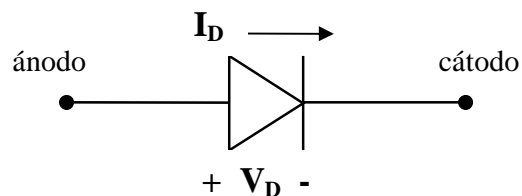


Profesor: Dr.-Ing. Paola Vega Castillo

Capítulo 3. El diodo y sus aplicaciones

3.1 Curva característica

La junta *PN* dio lugar a uno de los elementos semiconductores más comunes: el diodo. El diodo es un dispositivo de dos terminales que bloquea la corriente en una dirección y permite su paso en la otra dirección. La siguiente figura muestra el símbolo del diodo y sus terminales:



Como se aprecia en la figura, el triángulo del símbolo del diodo es como una flecha que apunta en la dirección en la que fluye la corriente técnica.

El diodo se polariza en directo aplicando un voltaje positivo al ánodo y negativo al cátodo. El ánodo es la terminal en contacto con el lado *p* de la unión, mientras que el cátodo contacta el lado *n*. Puesto que los huecos fluyen de *p* a *n*, el cátodo atrae a los huecos, de ahí su nombre. En el caso de los electrones, éstos son atraídos al material *p* y recolectados en el ánodo.

El diodo ideal puede modelarse como un cortocircuito para corrientes de polarización directa y como un circuito abierto para corrientes de polarización inversa. Esto se muestra en la figura 3.1.

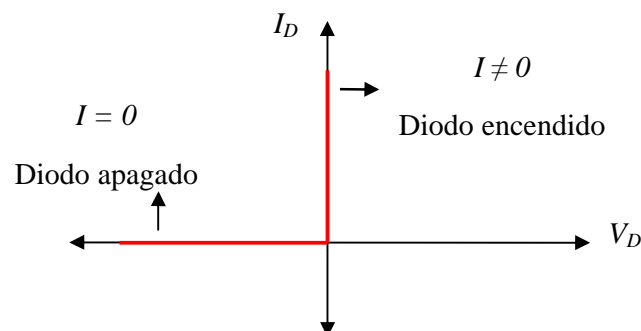


Figura 3.1. Curva característica del diodo ideal

La característica IV del diodo real está descrita por la ecuación de Shockley:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{nV_D}{V_t}} - 1 \right)$$

donde I_D es la corriente del diodo, I_S es la corriente de saturación de reversa, V_D es el voltaje aplicado al diodo, V_t el voltaje térmico y n es un exponente que varía entre 1 y 2, y está determinado por las características constructivas del diodo.

La corriente de saturación de reversa depende de las características físicas del diodo, como sigue:

$$I_S = qA \left[\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \right]$$

donde A es el área transversal del diodo, D es el coeficiente de difusión, L es la longitud de difusión de los portadores minoritarios, n_{p0} es la concentración de electrones en el lado p en condiciones de equilibrio y p_{n0} es la concentración de huecos del lado n en condiciones de equilibrio.

La característica IV del diodo descrita por la ecuación de Schockley se presenta en la figura 3.2. Esta curva puede extenderse para mostrar el fenómeno de ruptura. Para voltajes de reversa más altos, el diodo entra en la región de ruptura y presenta una corriente de reversa no despreciable que crece rápidamente, como se muestra en la figura 3.3.

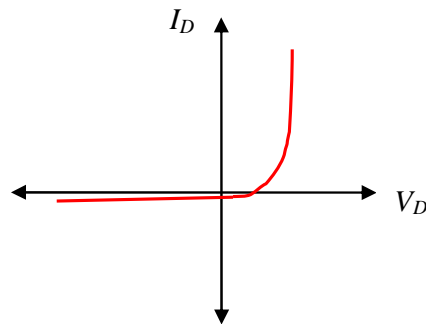


Figura 3.2. Curva característica del diodo real

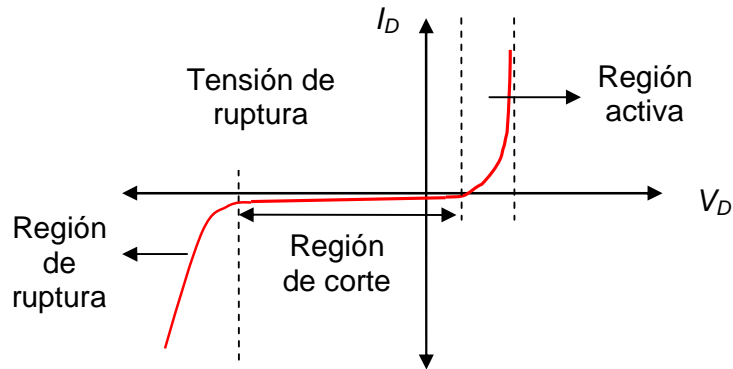


Figura 3.3. Curva característica del diodo real incluyendo la región de ruptura

Las causas de este aumento de corriente en reversa se discutirán más adelante cuando se consideren el efecto tener y el efecto de avalancha.

3.2 Modelos del diodo

3.2.1 Modelos de gran señal:

Los modelos de gran señal se utilizan para aplicaciones que no involucran amplificación o atenuación de señales. En gran señal, se distinguen cuatro modelos del diodo, mostradas en la figura 3.4.

- Modelo del diodo ideal: el diodo se modela como un corto circuito en polarización directa
- Modelo de caída de tensión constante: el diodo se modela como una fuente de tensión con la polaridad y magnitud de la tensión de activación del diodo
- Modelo lineal: agrega la resistencia dinámica del diodo al modelo de caída de tensión constante
- Modelo del diodo real, con la ecuación de Shockley

En la región de polarización inversa, todos los modelos representan al diodo como un circuito abierto.

3.2.1.1 Modelo lineal por tramos:

El diodo puede modelarse por tramos considerando tres regiones: región activa, región de corte y región de ruptura.

En la región activa el diodo puede modelarse como una fuente de tensión en serie con una resistencia. El valor de la fuente de tensión está dado por el potencial de contacto de la unión, y la resistencia está definida por la resistencia del diodo entre ánodo y cátodo, es decir, la pendiente de la curva característica en la región en la que el diodo se encuentra completamente activo. El circuito equivalente se muestra en la figura 3.5.

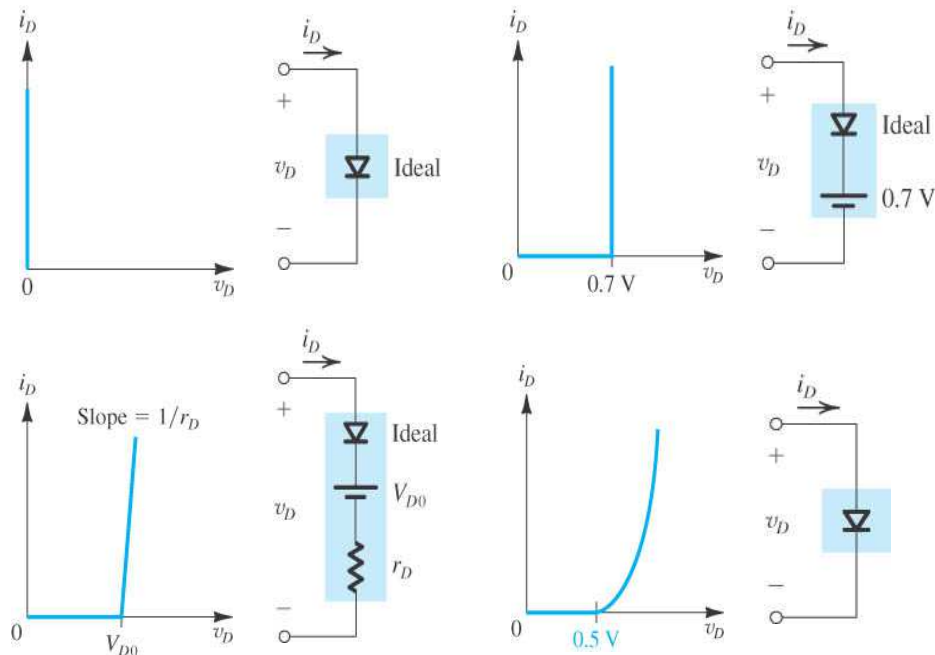


Figura 3.4. Modelos del diodo en la región de polarización directa: a) modelo ideal, b) modelo de caída de tensión constante, c) modelo lineal, d) modelo real

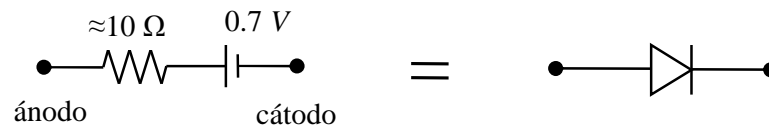


Figura 3.5. Modelo del diodo en la región activa

En la región de corte, el diodo se modela como un circuito abierto, ya que la resistencia del diodo en reversa es muy alta (en el orden de los GΩ). Por otra parte, el comportamiento en la región de ruptura se modela con una fuente de tensión en serie con una resistencia. El valor de la fuente de tensión está definida por la tensión de ruptura del diodo. Para diodos de baja potencia, esta tensión ronda típicamente los 6 V. En la región de ruptura, la resistencia del diodo es sólo ligeramente más alta que en la región activa y corresponde a la pendiente de la curva característica en la región de ruptura. El circuito equivalente se muestra en la figura 3.6.

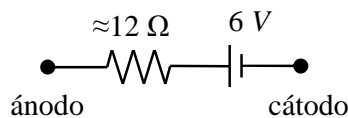


Figura 3.6. Modelo del diodo en la región de ruptura

3.3 Métodos de resolución de circuitos con diodos

Primero se considerará la operación del diodo fuera de la región de ruptura. Considérese el circuito serie en la figura 3.7:

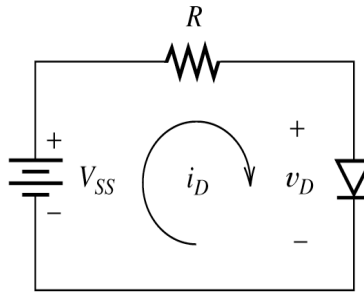


Figura 3.7. Ejemplo de circuito para estudio del método de línea de carga

El voltaje y la corriente a la que opera un elemento del circuito se conoce como punto de operación. Existen dos métodos para encontrar el punto de operación:

- La solución analítica del circuito, aplicando leyes de Kirchhoff, ecuaciones características de los dispositivos, etc.
- La solución gráfica, también llamada análisis de líneas de carga.

3.3.1 Solución analítica

La solución analítica del circuito se obtiene aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff. Para este caso, se tiene que:

$$V_S = V_R + V_D = IR + V_D$$

Sabemos que el diodo de silicio se activa aplicando una tensión de polarización directa, que está dada por el potencial de contacto de la unión *PN*. Este voltaje es de aproximadamente 0.7 V para que establezca una corriente en el circuito, es decir, se utiliza el modelo de caída de tensión constante. Conociendo un conjunto de parámetros de la ecuación puede entonces decirse que:

$$I = \begin{cases} 0 & \text{para } V_S \leq V_D \\ \frac{V_S - V_D}{R} & \text{para } V_S > V_D \end{cases}$$

R también puede dimensionarse conociendo cuánta corriente debe fluir en el circuito.

Por supuesto el punto de operación exacto del circuito puede resolverse también tomando la ecuación de Shockley y la malla del circuito.

3.3.2. Solución gráfica: análisis por línea de carga

El análisis de línea de carga consiste en resolver gráficamente las ecuaciones de la solución numérica. Para ello se procede como sigue:

1. Separar el circuito en una red de entrada, que incluye la fuente de entrada y una red de salida, que incluye la sección de la red en la que se definió la salida.
2. Graficar las características IV de los elementos del circuito de cada red en un mismo sistema de coordenadas voltaje-corriente y encontrar la característica IV resultante para cada red.
3. Encontrar la intersección de las curvas características de la red de entrada y la red de salida.

Para el ejemplo del circuito serie, el gráfico de líneas de carga queda como muestra la figura 3.8, donde se muestra la curva IV del diodo (red de salida) y la curva IV del equivalente de Thévenin del resto del circuito (red de entrada). El punto de intersección es el punto de operación, también llamado punto quiescente (punto Q).

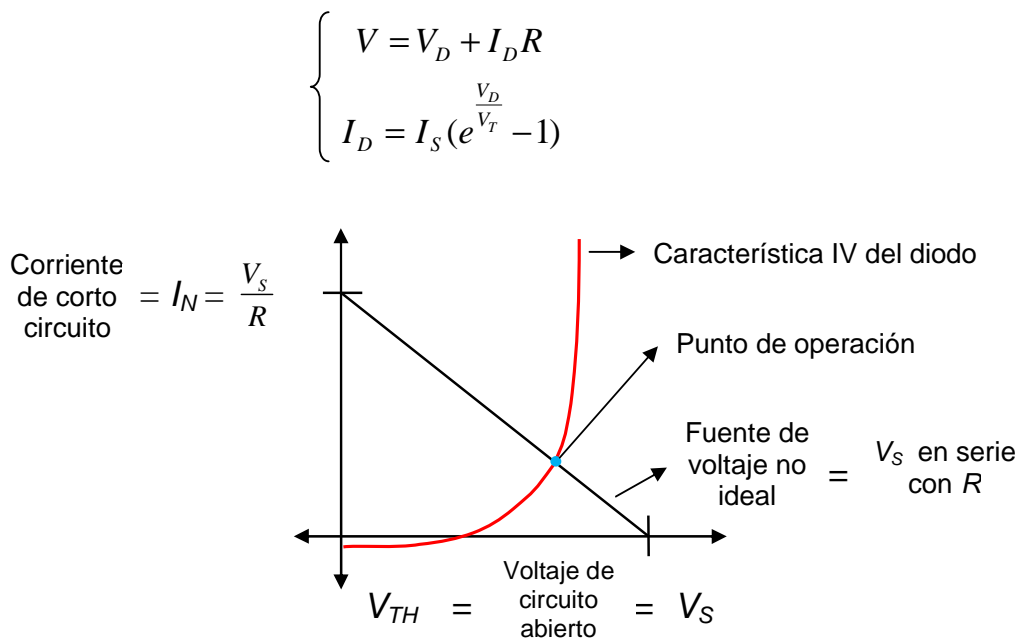
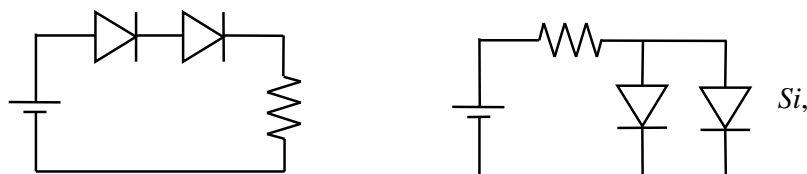


Figura 3.8. Solución del circuito utilizando el método de línea de carga

Aplicaciones del Diodo

a) Diodos en serie, diodos en paralelo y antiparalelo

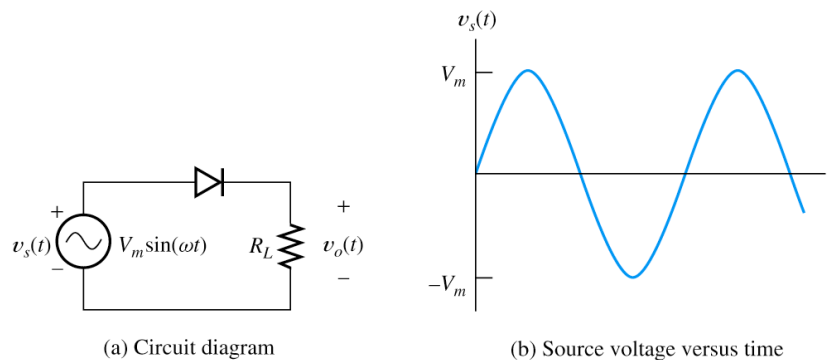


En el caso de diodos en serie, si ambos conducen en la misma dirección, sus caídas de potencial se suman, y si tienen direcciones de conducción opuestas, no fluirá corriente por ellos, excepto que se den las condiciones para que uno de ellos entre en la región de ruptura.

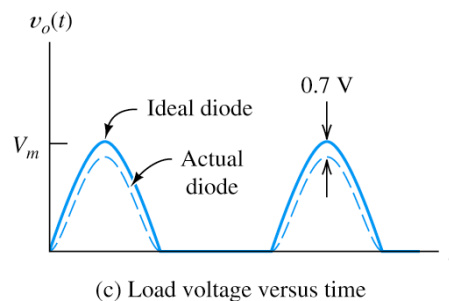
En caso de diodos en paralelo, el diodo con menor potencial de contacto se activará, fijando la tensión del diodo que se encuentra en paralelo e inactivándolo. Para diodos en antiparalelo (direcciones de conducción opuestas), es claro que sólo se activará el diodo que esté polarizado en directa.

b) Rectificadores

- **Rectificador de media onda:**



Ideal:



✓ ¿Cuál es el valor medio?

Definición de valor medio:

$$\frac{1}{T} \int_0^T f_{(t)} dt = \bar{f}$$

➤ Caso ideal:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_p \sin \theta d\theta \quad \text{en términos del ángulo}$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_p \sin \omega t dt \quad \text{en términos de tiempo}$$

pero como sólo hay media onda se integra hasta T/2:

$$\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_p \sin \omega t dt \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{V_p}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt$$

$$\frac{V_p}{T} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot -\cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t \right) \Bigg|_0^{\frac{T}{2}}$$

$$\frac{V_p}{2\pi} \cdot - \left(\cos \frac{2\pi T}{T} - \cos 0^\circ \right)$$

$$-\frac{V_p}{2\pi} (-1 - 1)$$

$$\frac{V_p}{\pi} \approx 0.318 V_p \quad \Rightarrow \quad \text{Independiente de la frecuencia}$$

➤ Caso real:

Determinar los tiempo en que el diodo conduce y deja de conducir

$$\text{Si } V_p \gg V_D, \bar{V} \approx \text{caso ideal} = 0.318 V_p$$

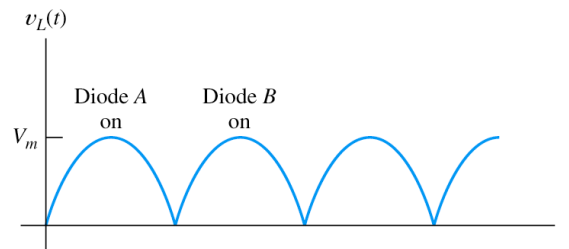
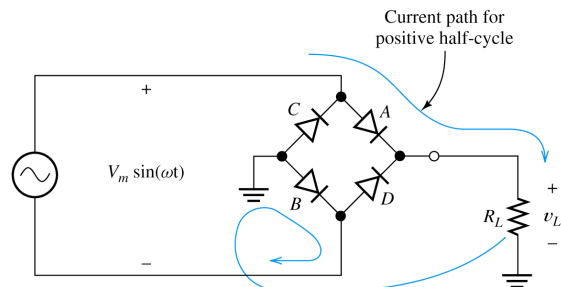
¿Qué pasa si no se tiene el dato del período de la señal, pero se desea calcular el voltaje promedio de manera exacta? En ese caso, debe integrarse en términos de ángulo. El valor del ángulo se determina por evaluación de la función de la tensión de entrada:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} V_p \sin \omega t \, dt$$

• **Rectificador de onda completa:**

Semiciclo positivo: conducen los diodos D_A y D_B

Semiciclo negativo: conducen los diodos D_C y D_D



Nótese que la polaridad de la tensión en la carga no cambia, a pesar de la variación de polaridad de la fuente, es decir, se rectifica la señal.

¿Cuánto es el valor medio de la tensión de salida? Dos veces el área en el caso de media onda para el mismo período:

$$2 \cdot \bar{V}_{1/2 \text{ onda}}$$

$$2 \cdot 0.318 V_p = 0.636 V_p$$

Véase por medio de la integral

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_p \sin \omega t \, dt = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} V_p \sin \omega t \, dt$$

$$T' = \frac{T}{2} \Rightarrow \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} V_p \sin \omega t \, dt$$

$$\frac{V_p}{T/2} \int_0^{T/2} V_p \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{V_p}{T/2} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot -\cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \Big|_0^{T/2}$$

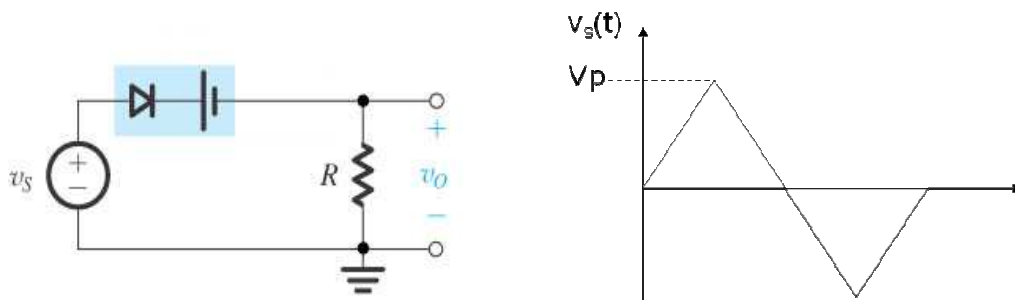
$$\frac{V_p}{T/2} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot -\cos \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \Big|_0^{T/2}$$

$$\frac{-V_p}{\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{T}{2} \right) - \cos 0 \right) = \frac{-V_p(-1-1)}{\pi} = \frac{2V_p}{\pi}$$

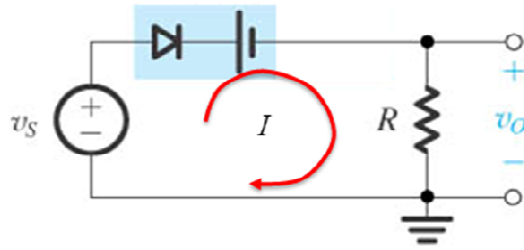
Igual a dos veces el valor del caso de media onda e independiente de la frecuencia. Nótese que las fórmulas de valor medio de los rectificadores de media onda y onda completa se derivan suponiendo diodos ideales.

Recortador Serie:

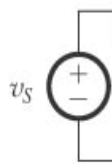
Diodo en serie con la salida. Es en realidad un rectificador de media onda que puede tener una fuente de tensión de CD en serie.



1. Si el diodo conduce, ¿Qué dirección tendría la corriente?



2. ¿Qué fuente originaría una corriente en esa dirección?



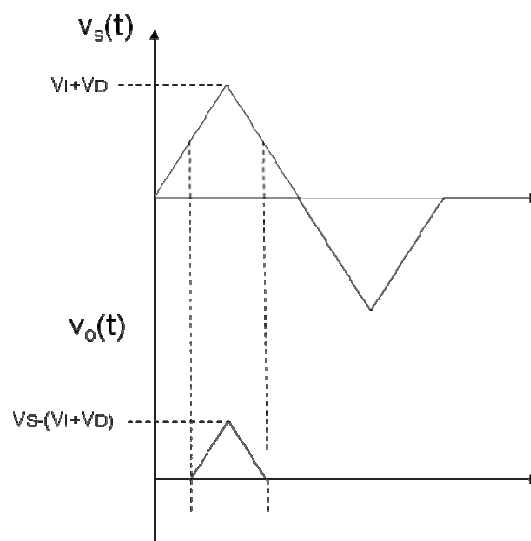
3. ¿En qué condiciones de V_s hay una polarización adecuada para que el diodo conduzca?

$$V_s > V_I + V_D$$

4. ¿Qué pasa en la salida cuando el diodo conduce y cuando no conduce?

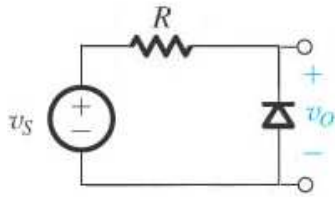
$$\text{No conduce} \Rightarrow I = 0, V_O = 0$$

$$\text{Conduce} \Rightarrow V_O = V_s - V_I - V_D$$



Recortador Paralelo:

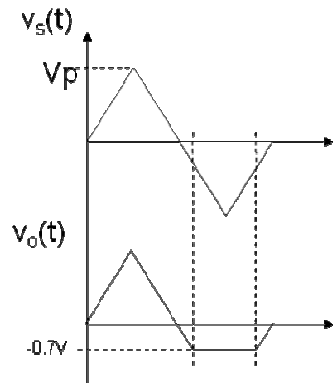
Diodo en paralelo (o en la rama en paralelo) con la salida.



Si el diodo conduce, $V_O = -0.7V$

Si el diodo no conduce, $V_O = V_S$

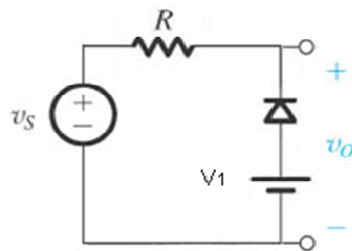
Diodo conduce en el semiciclo negativo



$V_S < -0.7V = \text{diodo activo}$

$V_S > -0.7V = \text{diodo inactivo}$

Puede agregarse fuentes en serie (recortador polarizado).



En el circuito de la figura anterior, el diodo conduce en el semiciclo negativo. En el semiciclo positivo, conduce si V_S puede mantenerlo polarizado en directa. El resto de la tensión cae en la resistencia R .

Conduce para $V_S < V_1$

No conduce para $V_S > V_1$

El diodo tiene exactamente la tensión para operar y $I = 0 \Rightarrow$

$$-V_S + V_R - V_D + V_1 = 0$$

$V_S = V_R - V_D + V_1 = V_1 - V_D$ dado que con $I = 0$, la tensión en la resistencia es cero

Si V_S es mayor que V_1 el diodo queda polarizado inversamente.

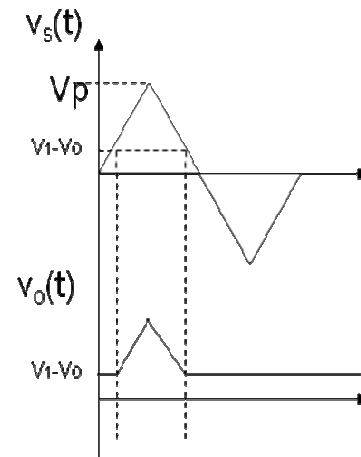
\Rightarrow Conduce si $V_S < V_1 - V_D$

$\Rightarrow -V_D - V_1 - V_O = 0$

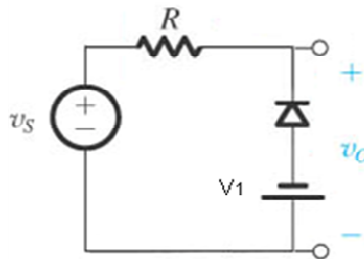
$V_O = V_1 - V_D$

No conduce si $V_S \geq V_1 - V_D$

$\Rightarrow V_O = V_S$



V_1 debe contrarrestar V_S y proveer polarización para el diodo. Ahora, invirtiendo la polaridad de V_1 , se tiene:



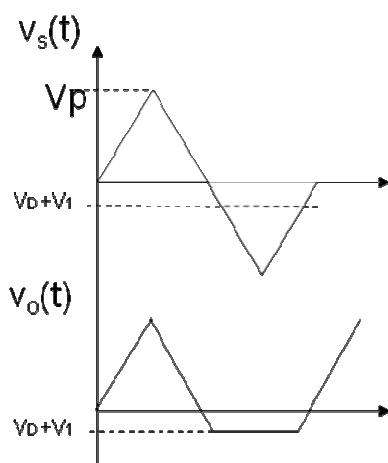
V_1 polariza el diodo inversamente.

$V_S > 0$ polariza el diodo inversamente

$V_S < 0$ puede polarizar el diodo directamente si contrarresta V_1 .

$\Rightarrow V_S > 0 =$ diodo no conduce, $V_O = V_S$

En el semiciclo negativo ($V_S < 0$) debe revisarse cuándo V_S tiene una magnitud tal que hace conducir el diodo. Cuando eso ocurre, la magnitud de la salida es $V_1 + V_D$, y la polaridad es negativa.

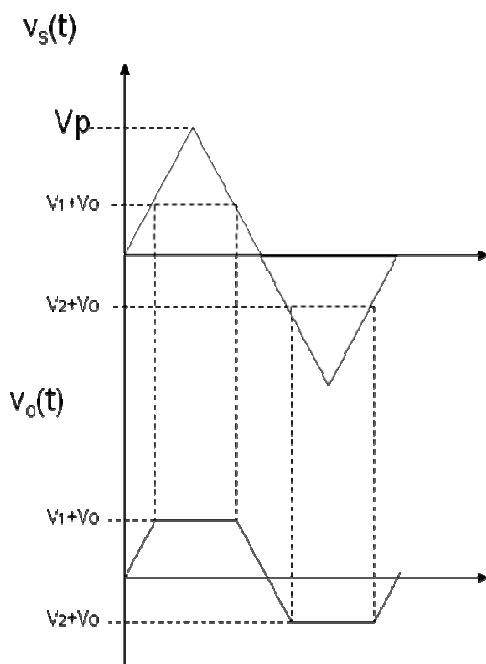
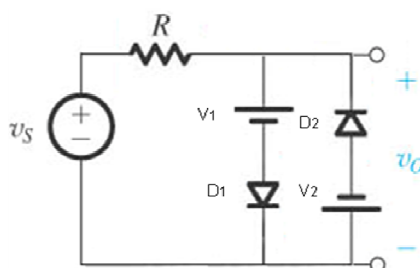


Conduce para V_S negativo

$$|V_S| > V_1 + V_D$$

V_S debe contrarrestar V_1 y polarizar el diodo

Ahora se analizará el caso para un recortador paralelo con dos ramas.



D_1 conduce en el semiciclo positivo.

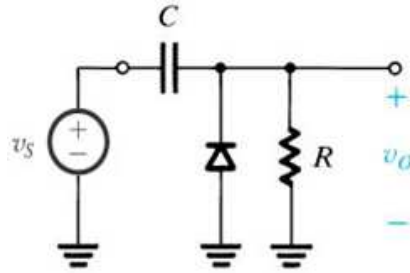
$$V_S > V_D + V_1$$

D_2 conduce en el semiciclo negativo.

$$V_S < V_D + V_2$$

$$\Rightarrow |V_S| > |V_2 + V_O|$$

• **Cambiador de Nivel (Sujetador):**



$\Rightarrow V_s > 0$ polariza el diodo en directa

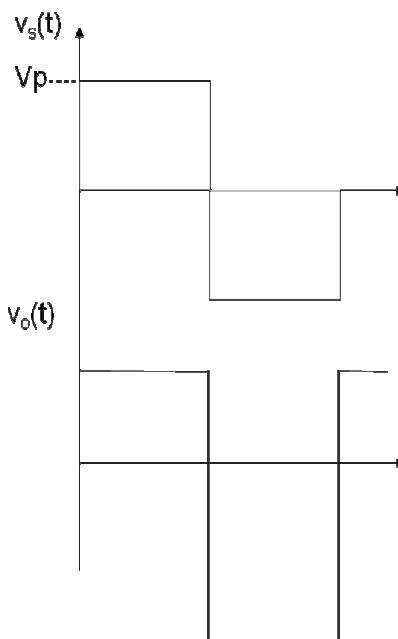
$$r_d \ll R, \quad \tau = r_d C \quad \text{Carga rápida del diodo}$$

C se carga hasta $V_s - V_D$, $V_o = V_D$

$\Rightarrow V_s < 0$ polariza el diodo en reversa

C se descarga a través de R, $\tau = RC$

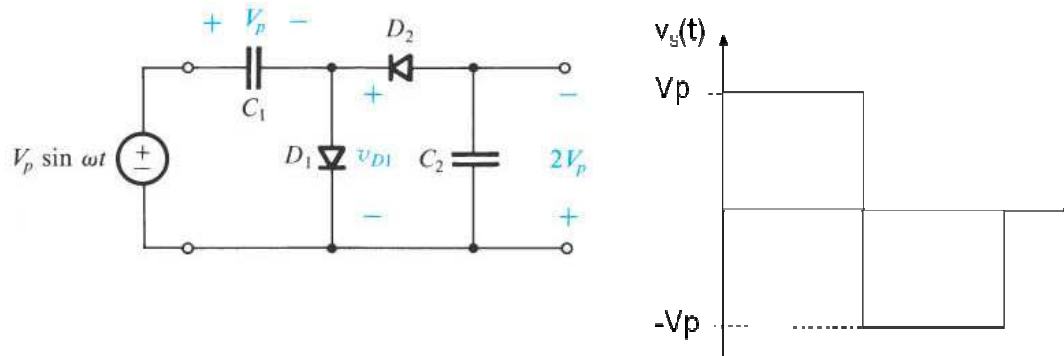
$$V_o = -V_s - (V_C - V_D) \approx -2V_s$$



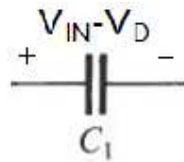
R y C deben escogerse de forma tal que:

$$RC \gg T/2$$

- Doblador de voltaje:**



$\Rightarrow V_s > 0$ D_1 conduce, D_2 en abierto, C_1 se carga, $V_{OUT} = V_{C_2}$



$\Rightarrow V_s < 0$ D_1 no conduce, D_2 conduce, $V_{OUT} \approx 2V_{IN} = V_{IN} + V_{C_1}$
 $V_{OUT} = V_{IN} + (V_{IN} - V_D)$

C_2 se carga por medio de D_2 $\tau_2 = r_{d_2} C_2$

C_1 se carga por medio de D_1 $\tau_1 = r_{d_1} C_1$

Igualmente, τ_1 y $\tau_2 \gg T/2$

Semiciclo positivo \rightarrow para proveer carga a C_1 , C_2 se descarga a través de RL.

Semiciclo negativo \rightarrow recarga de C_2 .

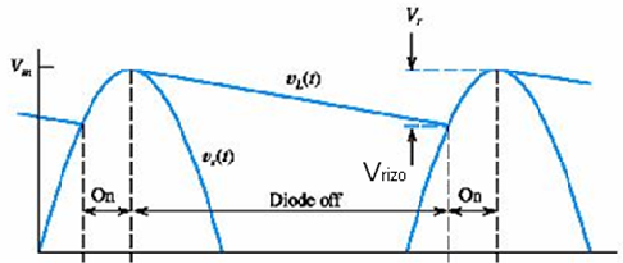
- Rectificador de media onda con filtro:**

Es un rectificador de media onda con un capacitor en paralelo con la salida, con el fin de disminuir la variación de la tensión de salida (rizo) y proveer de energía a la carga durante el semiciclo en que el diodo no conduce.

¿De qué valor es el capacitor?

Asumir diodo ideal

Rizo: variación de V_{OUT}



$$C \Rightarrow i_C = \frac{Cdv}{dt} \quad \text{si } i_C = cte, i_R = cte = V_{OUT} = cte$$

$$i_L = \frac{Cdv}{dt} \Rightarrow \frac{i_L \Delta t}{\Delta V} \approx C \quad \begin{matrix} \Delta t \approx T \\ \Delta V = V_{rizo} \end{matrix}$$

$$\frac{i_L T}{V_{rizo}} \approx C$$

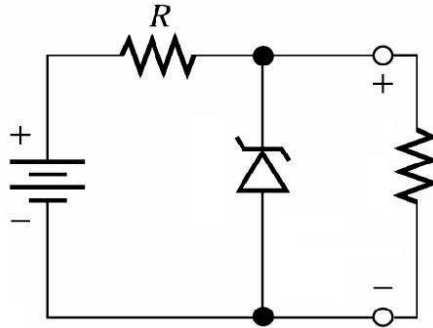
- Rectificador de onda completa con filtro:**

Es un rectificador de onda completa con un capacitor en paralelo con la salida, con el fin de disminuir la variación de la tensión de salida (rizo).

$$\frac{i_L \cdot \frac{T}{2}}{V_{rizo}} \approx C$$

T = período de onda sin rectificar

- Análisis gráfico del regulador con diodo Zener**



R: resistencia de limitación de corriente

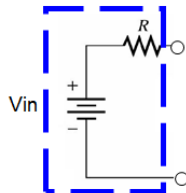
Corriente de operación del diodo Zener: $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$, con $I_{Zmin} = 0.1 I_{Zmax}$ e I_{Zmax} determinada por máxima potencia del diodo:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{Zmax}}{V_Z}$$

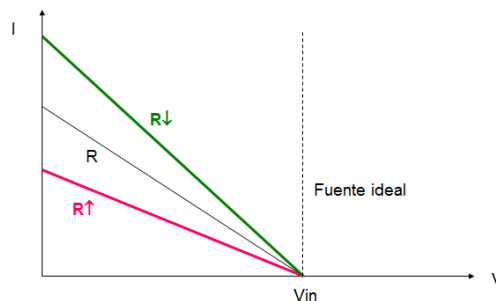
En este regulador puede variar la tensión de entrada y la resistencia de carga. A pesar de eso, la tensión de salida debe mantenerse constante.

Siguiendo el método de la línea de carga, dividimos el circuito en una red de entrada y una red de salida y obtendremos la curva característica de cada red.

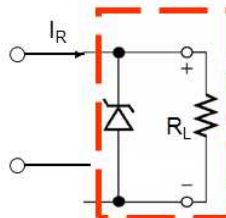
La red de entrada es una fuente de tensión real:



La curva característica de la red de entrada se define con dos puntos: la corriente de Norton y la tensión de Thevenin. Esta curva característica resultante es:



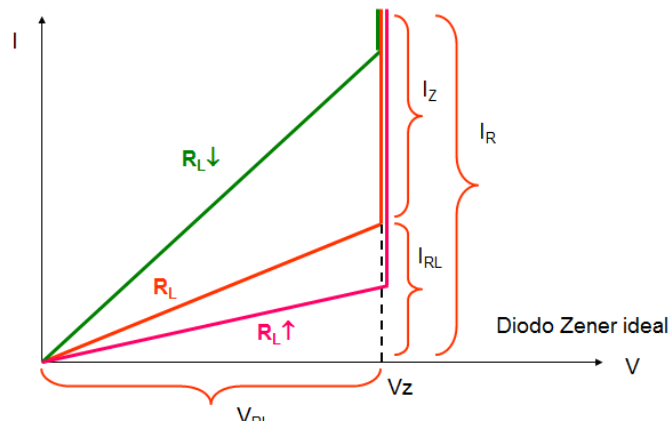
La red de salida incluye el diodo Zener y la resistencia de carga:



La curva característica de la red de salida se obtiene al tomar en cuenta lo siguiente:

- con $V < V_Z$, el diodo Zener no está activo, solo se ve el comportamiento de R .
- con $V = V_Z$, el punto de intersección de la curva característica de la resistencia con la curva característica del diodo Zener indica la corriente en la resistencia cuando su tensión es $V_{RL} = V_Z$

La corriente que entra al nodo de la red de salida, es decir, la corriente provista por la fuente, se distribuye entre el diodo Zener y la carga.



Para encontrar el punto de operación del circuito completo, debe encontrarse la intersección de las dos curvas resultantes de las redes de entrada y salida.

Para operar, el regulador debe cumplir los siguientes criterios:

- 1) La tensión de la fuente debe ser suficiente para polarizar el Zener, y el divisor de tensión entre la resistencia de carga y la resistencia limitadora debe dar como resultado una tensión mayor o igual a la tensión Zener.
- 2) La resistencia limitadora debe proteger al diodo Zener, de forma que cuando la resistencia de carga aumenta (y por lo tanto I_{RL} disminuye), la corriente que fluye por el diodo Zener no debe sobrepasar I_{Zmax} .
- 3) El diodo Zener requiere una corriente mínima I_{Zmin} para operar en ruptura

