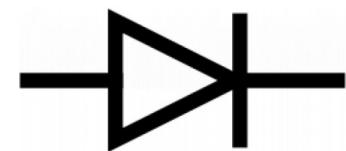


EL DIODO

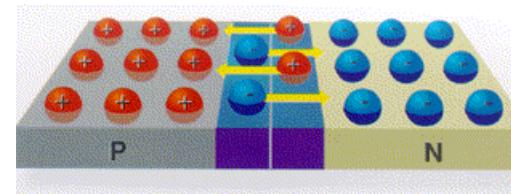




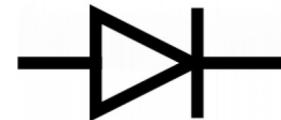
¿Qué es?



- Es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de corriente eléctrica a través de él en **un sólo sentido**.
- Un diodo se forma al unir un semiconductor tipo p con otro de tipo n, ambos construidos a partir de la misma base: Si o Ge. Las terminales del diodo se unen a cada región.
- El límite dentro del cristal de estas dos regiones, llamado una unión PN, es donde la importancia del diodo toma su lugar.



Construcción



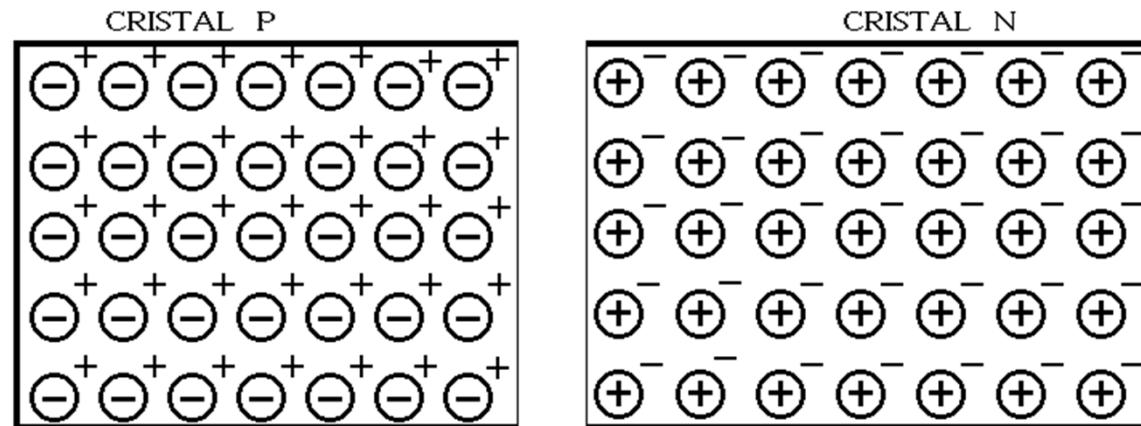
- Al unir ambos cristales, se manifiesta una difusión de electrones del cristal n al p (J_e). Al establecerse una corriente de difusión, estas corrientes aparecen cargas fijas en una zona a ambos lados de la unión, zona que recibe el nombre de **región de agotamiento**.
- A medida que progresá el proceso de difusión, la región de agotamiento va incrementando su anchura profundizando en los cristales a ambos lados de la unión
- Sin embargo, la acumulación de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico (E) que actuará sobre los electrones libres de la zona n con una determinada **fuerza de desplazamiento**, que se opondrá a la corriente de electrones y terminará deteniéndolos.



Construcción

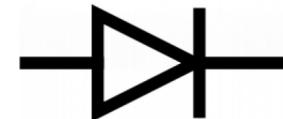


- Este campo eléctrico es equivalente a decir que aparece una diferencia de tensión entre las zonas p y n. Esta diferencia de potencial (V_D) es de 0,7 V en el caso del silicio y 0,3 V para los cristales de germanio.
- La anchura de la región de agotamiento una vez alcanzado el equilibrio, suele ser del orden de 0,5 micras pero cuando uno de los cristales está mucho más dopado que el otro, la zona de carga espacial es mucho mayor.





Funcionamiento



- **Polarización:** aplicación de un voltaje externo a través de las dos terminales del dispositivo para extraer una respuesta.
- Sin ninguna polarización aplicada a través de un diodo semiconductor, el flujo neto de carga en una dirección es cero, es decir, *la corriente en condiciones sin polarización es cero.*



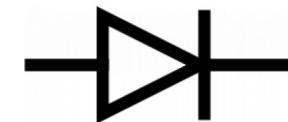
Funcionamiento



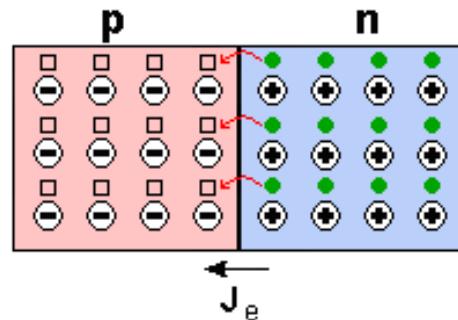
Sin polarización ($V_D = 0V$):

- Cualesquiera portadores minoritarios (huecos) del material tipo n localizados en la región de empobrecimiento por cualquier razón pasarán de inmediato al material tipo p.
- Los portadores mayoritarios del material tipo n (electrones) deben vencer las fuerzas de atracción de la capa de iones positivos del material tipo n y el escudo de iones negativos en el material tipo p para poder pasar al área más allá de la región de empobrecimiento del material tipo p.
- El número de portadores mayoritarios es tan grande en el material tipo n que invariablemente habrá un cierto número de portadores mayoritarios con suficiente energía cinética para que atraviesen la región de agotamiento hacia el material p.

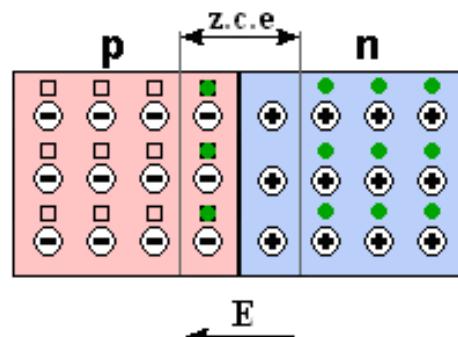
Funcionamiento



Sin polarización ($V_D = 0V$):



● → átomo pentavalente con un electrón en su orbital de conducción
□ → átomo trivalente con un hueco en su orbital de valencia



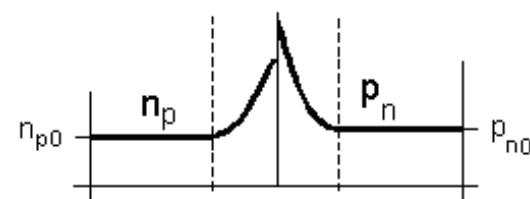
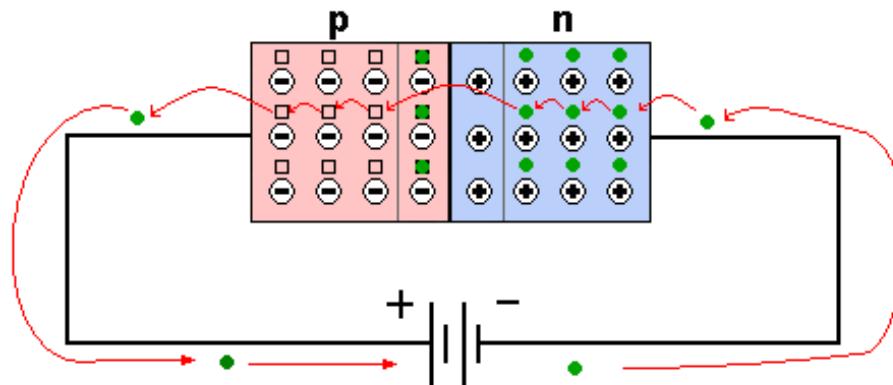
● → ión positivo
■ → ión negativo



Funcionamiento



Polarización en directa ($V_D > 0V$):





Funcionamiento



Polarización en directa ($V_D > 0V$):

- *Efecto: reducción del ancho de la región de agotamiento* debido a la recombinación de los electrones (material tipo n) y huecos (material tipo p) con los iones próximos al límite.
- El flujo de **portadores minoritarios no cambia** de magnitud.
- Producción de un **intenso flujo de portadores mayoritarios** a través de la unión.
- Conforme se incrementa la magnitud de polarización aplicada, el ancho de la **región de empobrecimiento continuará reduciéndose**, produciendo un **crecimiento exponencial de la corriente**.
- Cuando la polarización aplicada es mayor que la diferencia de potencial en la zona de carga espacial, los electrones libres del cristal n, adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos del cristal p, los cuales previamente se han desplazado hacia la unión p-n.



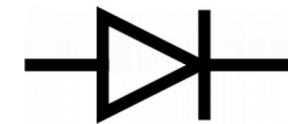
Funcionamiento



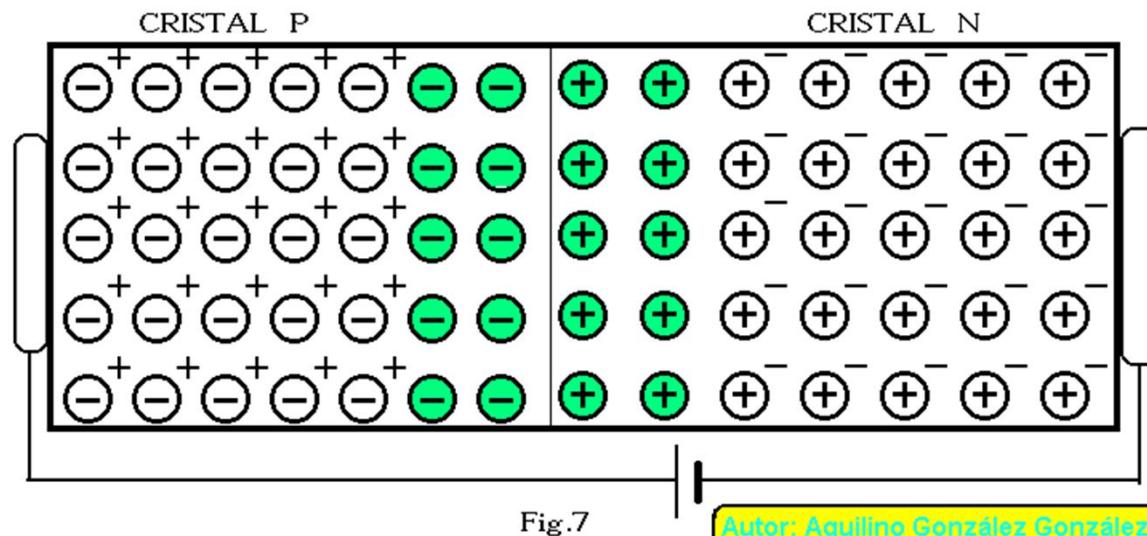
Polarización en directa ($V_D > 0V$):

- Una vez que un electrón libre de la zona n salta a la zona p atravesando la zona de carga espacial, cae en uno de los múltiples huecos de la zona p convirtiéndose en electrón de valencia.
- Este electrón de valencia es atraído por el polo positivo de la batería y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal p, desde el cual se introduce en el hilo conductor y llega hasta la batería.
- Con la batería cediendo electrones libres a la zona n y atrayendo electrones de valencia de la zona p, aparece a través del diodo una corriente eléctrica constante hasta el final.

Funcionamiento



Polarización en directa ($V_D > 0V$):

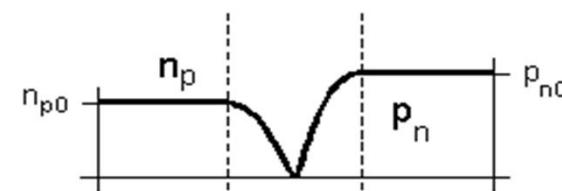
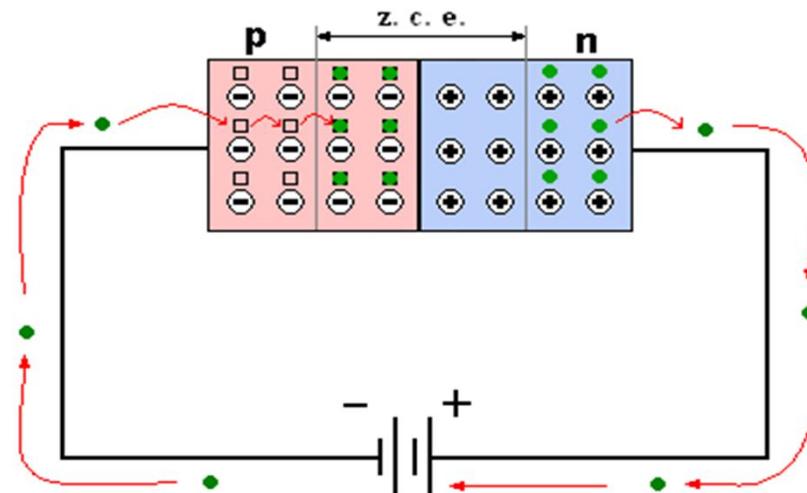




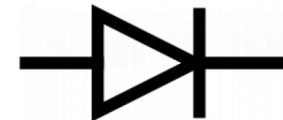
Funcionamiento



Polarización en inversa ($V_D < 0V$):



Funcionamiento



Polarización en inversa ($V_D < 0V$):

- *Efecto:* mayor apertura en la región de empobrecimiento, creándose una barrera demasiado grande para que los portadores mayoritarios la puedan superar, por lo que *el flujo de portadores mayoritarios se reduce a cero*.
- El polo positivo de la batería atrae a los electrones libres de la zona n, dejando a los átomos donadores de electrones con una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en **iones positivos**.
- De forma similar, el polo negativo de la batería cede electrones libres a los átomos aceptores de la zona p, éstos caen dentro de los huecos de los átomos aceptores quienes adquieren una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en **iones negativos**.
- Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la batería.



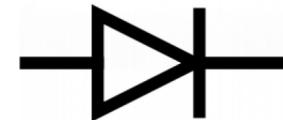
Funcionamiento



Polarización en inversa ($V_D < 0V$):

- El número de portadores minoritarios que entran a la región de empobrecimiento no cambia, produciendo un **flujo de portadores minoritarios** de la misma magnitud que en el caso sin polarización.
- A su vez, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente (del orden de $1 \mu\text{A}$).
- Esta corriente en condiciones de polarización en inversa se llama **corriente de saturación en inversa**, representada por I_s .
- Características de I_s :
 - No es mayor a unos cuantos microamperes.
 - Alcanza su nivel máximo con rapidez.
 - No cambia de manera significativa con los incrementos en el potencial de polarización en inversa.

Funcionamiento



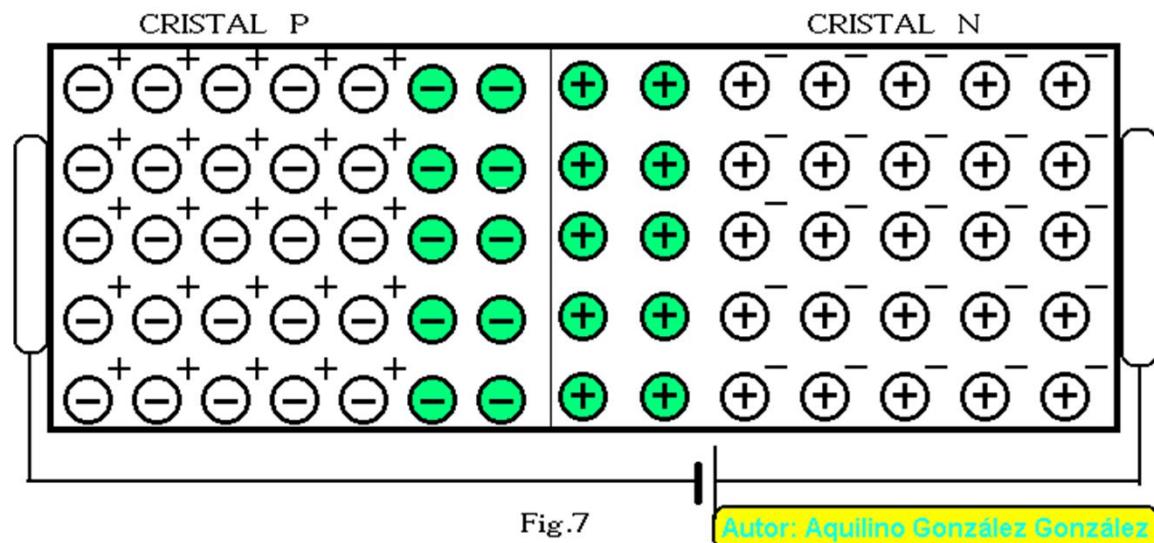
Polarización en inversa ($V_D < 0V$):

- Además, existe también una denominada **corriente superficial de fugas** la cual, conduce una pequeña corriente por la superficie del diodo.
- En la superficie, los átomos de silicio no están rodeados de suficientes átomos para realizar los cuatro enlaces covalentes necesarios para obtener estabilidad.
- Esto hace que los átomos de la superficie del diodo, tanto de la zona n como de la p, tengan huecos en su orbital de valencia con lo que los electrones circulan sin dificultad a través de ellos.
- No obstante, al igual que la corriente inversa de saturación, la corriente superficial de fuga es despreciable.

Funcionamiento



Polarización en inversa ($V_D < 0V$):



Funcionamiento



- Video

Curva característica

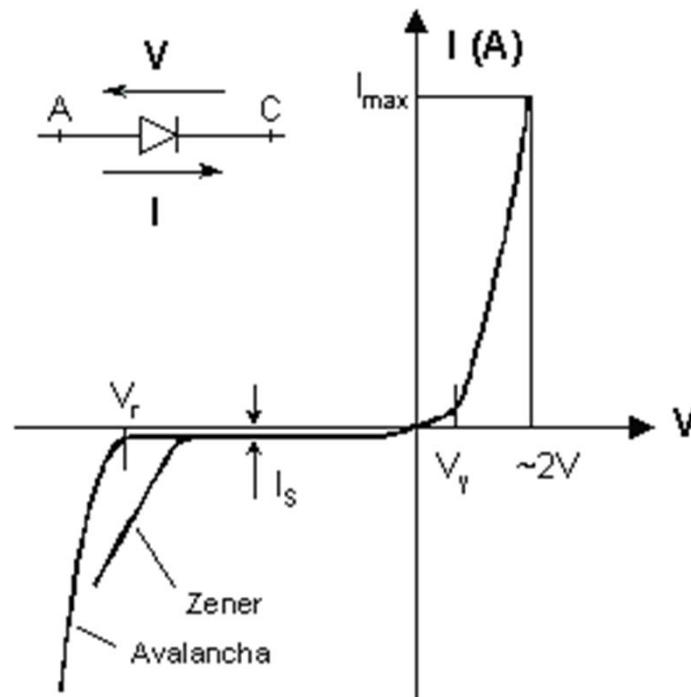


V_g Tensión umbral de polarización directa coincide en valor con la tensión de la zona de carga espacial del diodo no polarizado

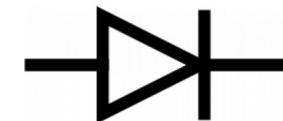
I_{max} Corriente máxima que puede conducir el diodo sin fundirse por el efecto Joule. Dado que es función de la cantidad de calor que puede disipar el diodo, depende sobre todo del diseño del mismo.

I_s Corriente inversa de saturación, pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo por la formación de pares electrón-hueco debido a la temperatura.

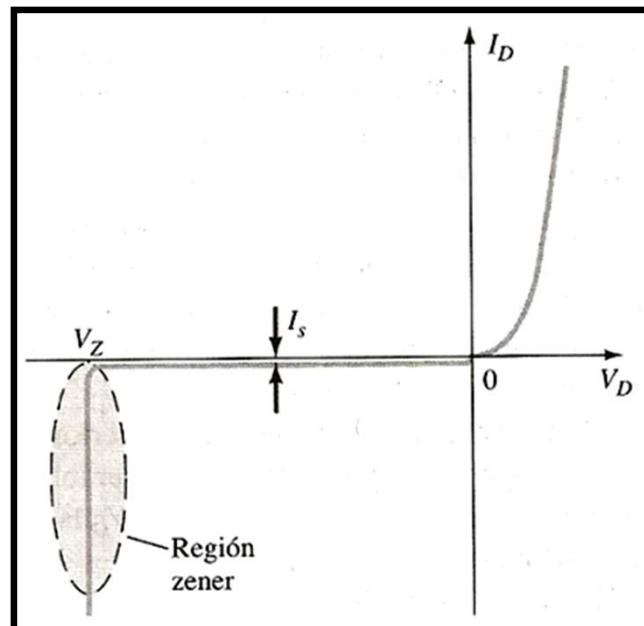
V_r Tensión de ruptura, tensión inversa máxima que el diodo puede soportar antes de darse el efecto avalancha.



Curva característica



□ Región Zener



- ▶ En la gráfica V - I del diodo existe un punto donde la aplicación de un voltaje demasiado negativo producirá un cambio abrupto de las características típicas.
- ▶ La corriente se incrementa muy rápido en una dirección opuesta a la de la región de voltaje positivo.
- ▶ El potencial de polarización en inversa que produce este cambio de las características se llama: **Potencial Zener**, cuyo símbolo es V_Z .

Curva característica



Región Zener

- Al incrementar el voltaje en la región de polarización inversa, se incrementa la velocidad de los portadores minoritarios generadores de la corriente I_S .
- Estos portadores logran adquirir una mayor velocidad y por tanto aumentan su energía cinética asociada ($W_k=1/2mv^2$) volviéndose suficiente para liberar más portadores por colisiones con otros átomos que de otra forma serían estables.
- Al chocar estos portadores con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Al ser liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándolos a su vez.



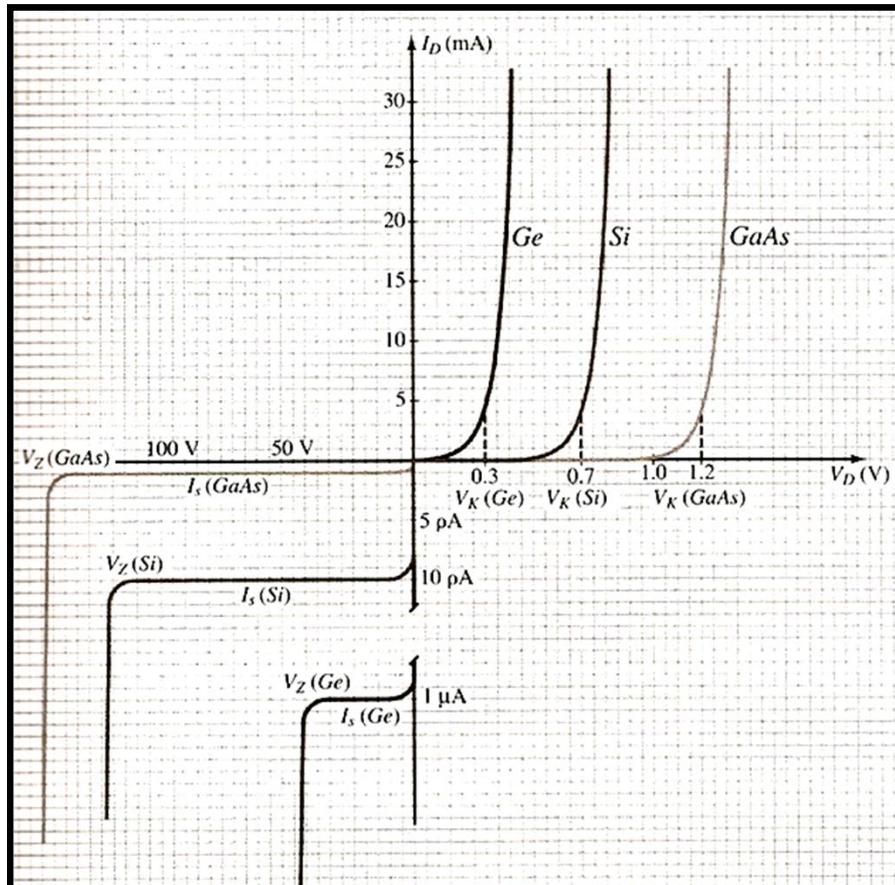
Curva característica



Región Zener

- Los diodos que emplean esta parte única de la característica de una unión *p-n* (región zener) se llaman: **diodos Zener**.
- El máximo potencial de polarización en inversa que se puede aplicar antes de entrar a la región zener se llama *voltaje inverso pico* (valor **PIV**) o *voltaje de reversa pico* (valor **PRV**).

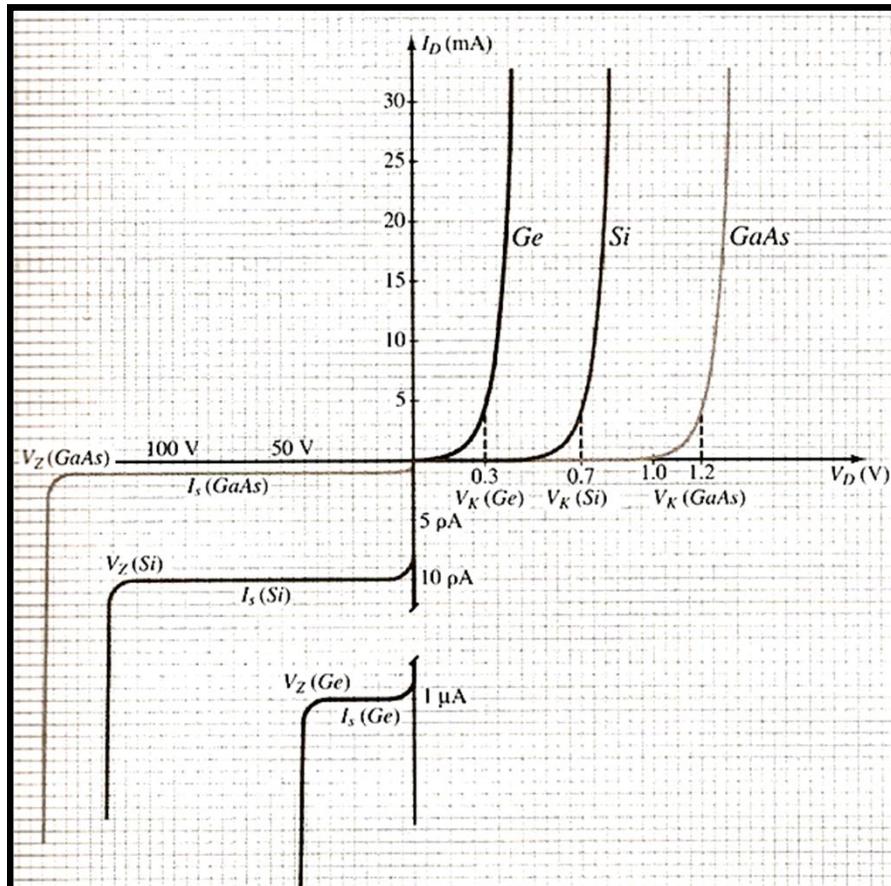
Diodos de diferentes compuestos: Ge, Si y GaAs.



- El *punto de levantamiento vertical* de las características *es diferente para cada material*, aunque la forma general de cada una es muy semejante.
- Los voltajes de rodilla (V_k) se presentan a continuación:

Semiconductor	$V_k(V)$
Ge	0.3
Si	0.7
GaAs	1.2

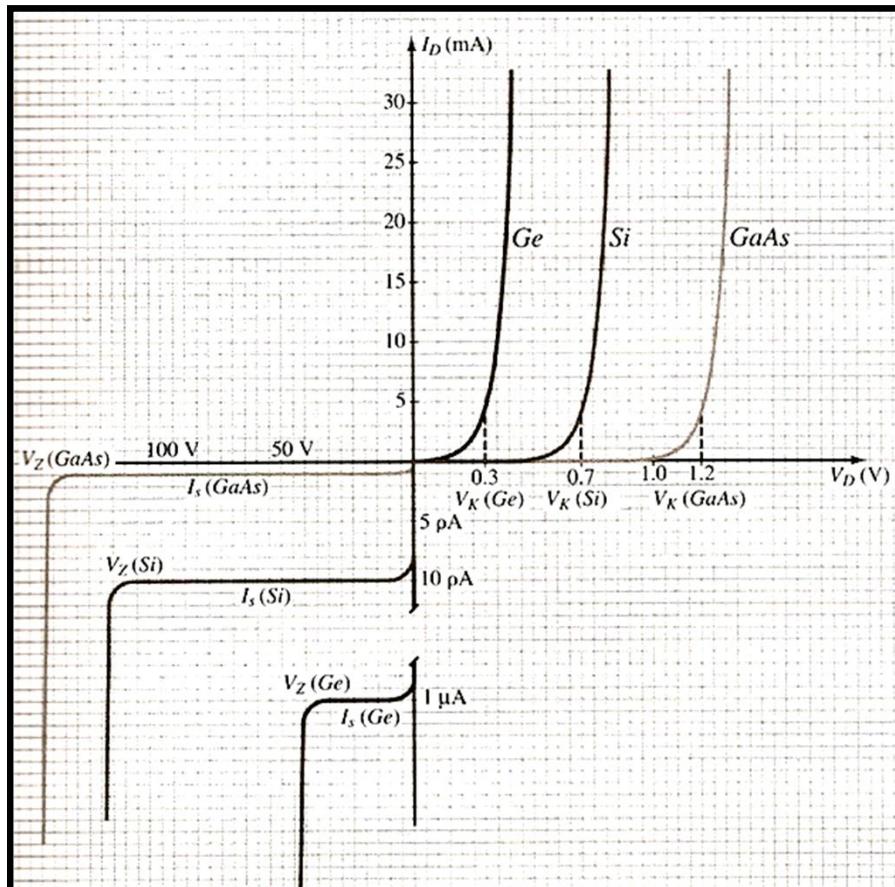
Diodos de diferentes compuestos: Ge, Si y GaAs.



- ▶ La forma de la curva en la región de polarización inversa es parecida para cada material.
- ▶ Diferencia significativa en las magnitudes de I_s .

Semiconductor	I_s
Ge	$1\mu\text{A}$
Si	10pA
GaAs	1pA

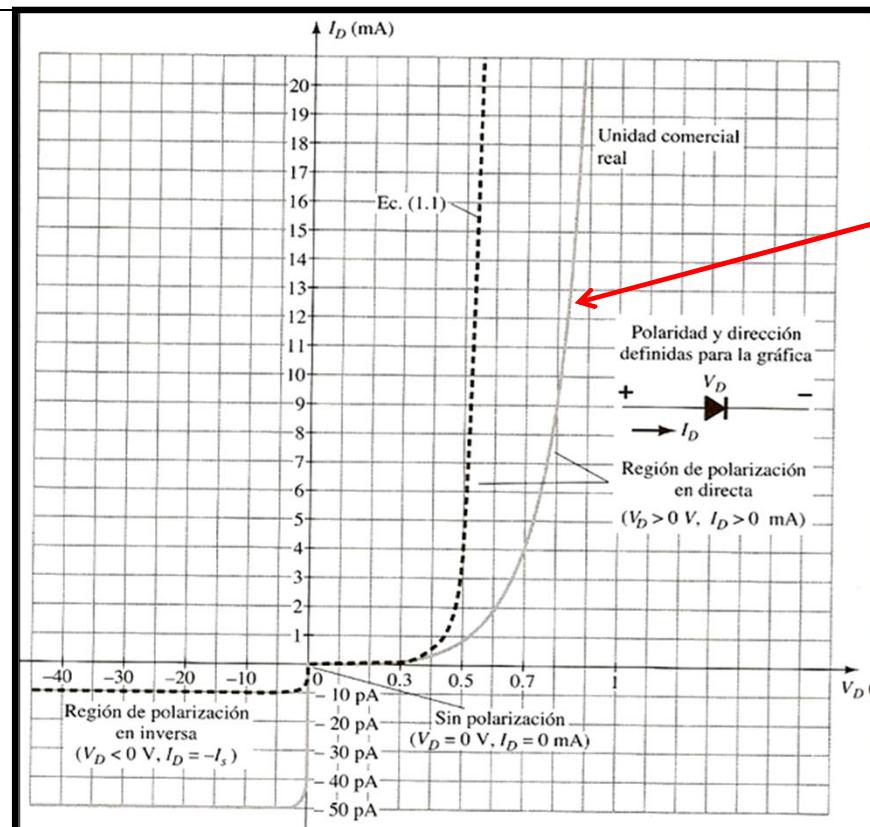
Diodos de diferentes compuestos: Ge, Si y GaAs.



- Las magnitudes relativas a los voltajes zener para cada material son distintas.

Semiconductor	V_Z
Ge	100V-400V
Si	50V-1kV
GaAs	10%+Si

Desvío de la condición ideal del diodo semiconductor de Si.



Aumento del voltaje debido
a la presencia de resistencia
de cuerpo interna y
resistencia de contacto
externa de un diodo.

Funcionamiento



- Las características generales de un diodo semiconductor se pueden definir mediante la *ecuación de Shockley*, para las regiones de polarización directa, inversa y cero:

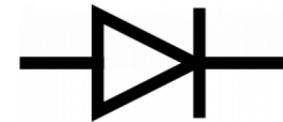
$$I_D = I_S \left(e^{V_D / nV_T} - 1 \right) \text{(Amperes)}$$

- Donde:
 - I_S es la corriente de saturación en inversa.
 - V_D es el voltaje en polarización directa aplicado a través del diodo.
 - n es un factor de idealidad, el cual es una función de las condiciones de operación y construcción física (varía entre 1 y 2).
 - V_T se llama al *voltaje térmico* y está determinado por:

$$V_T = \frac{kT}{q} \text{ Volts}$$

- ▶ k es la constante de Boltzmann = 1.38E-23 J/K.
- ▶ T es la temperatura absoluta en Kelvin = 273 + °C.
- ▶ q es la cantidad de carga del electrón = 1.6E-19 C.

Funcionamiento



- Valores positivos de V_D :

$$I_D \cong I_S \left(e^{V_D / nV_T} \right)$$

- Valores negativos de V_D :

$$I_D \cong -I_S$$

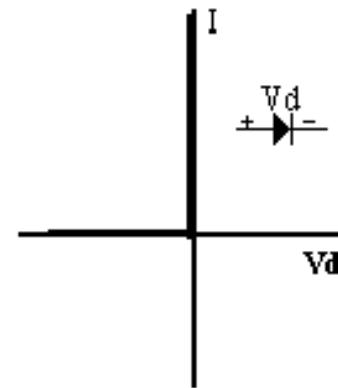
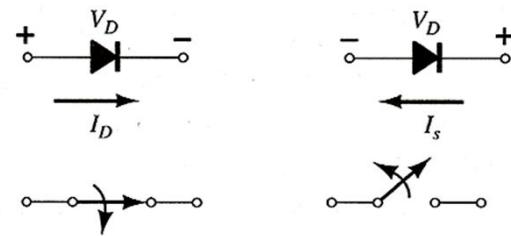
- Valor cero de V_D :

$$I_D = I_S \left(e^0 - 1 \right) = I_S \left(1 - 1 \right) = 0$$

El diodo ideal



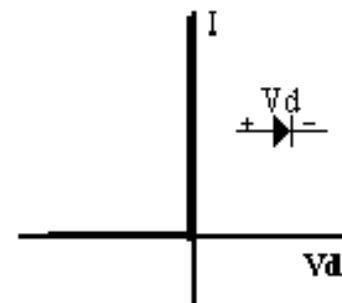
1. Permite un flujo abundante de carga cuando se establece una polarización en directa.
2. Permite un nivel muy pequeño de corriente (casi cero) cuando la polarización es en inversa.



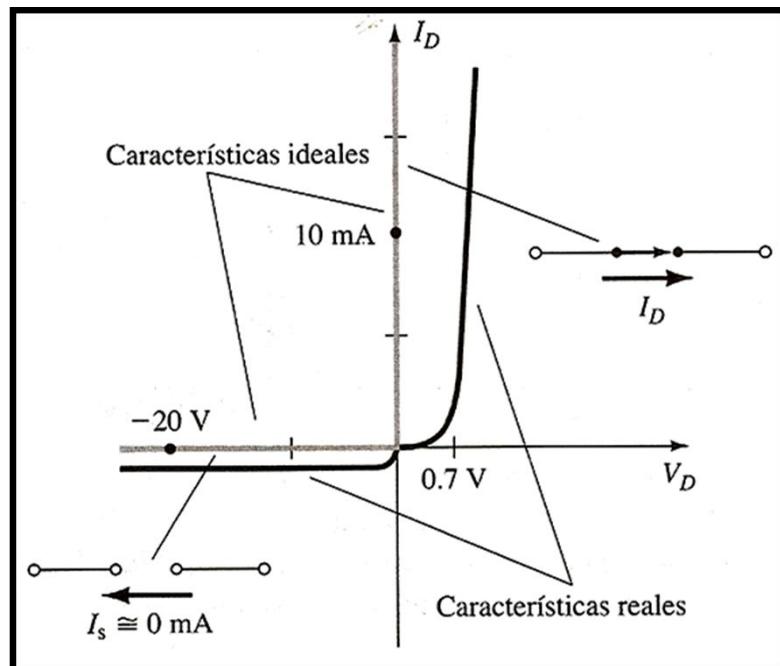
El diodo ideal



- Para describir el comportamiento del diodo semiconductor se utiliza la analogía con un *interruptor mecánico*, ya que el diodo puede controlar el flujo de corriente entre sus dos terminales.
- El diodo se diferencia del interruptor en el sentido de que cuando éste se cierra *sólo permite que la corriente fluya en una dirección*.
- A cualquier nivel de corriente sobre la *línea vertical*, el voltaje a través del diodo ideal es de **0V** y la resistencia es de **0Ω**.
- En la *línea horizontal*, la corriente es de **0mA** y la resistencia es de **∞Ω**.



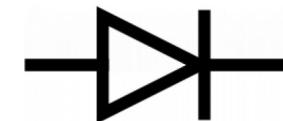
El diodo ideal



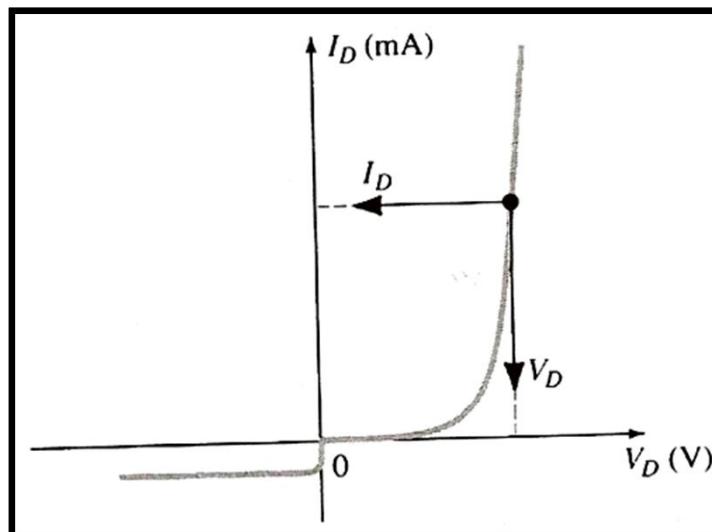
- Por la forma y ubicación de la curva del diodo comercial en polarización directa, **existirá una resistencia de diodo de más de 0Ω .**
- A medida que el **punto de operación de un diodo se mueve** de una región a otra, **su resistencia también cambia** debido a la forma no lineal de la curva característica.



Diodo semiconductor.



Resistencia de CD o estática:

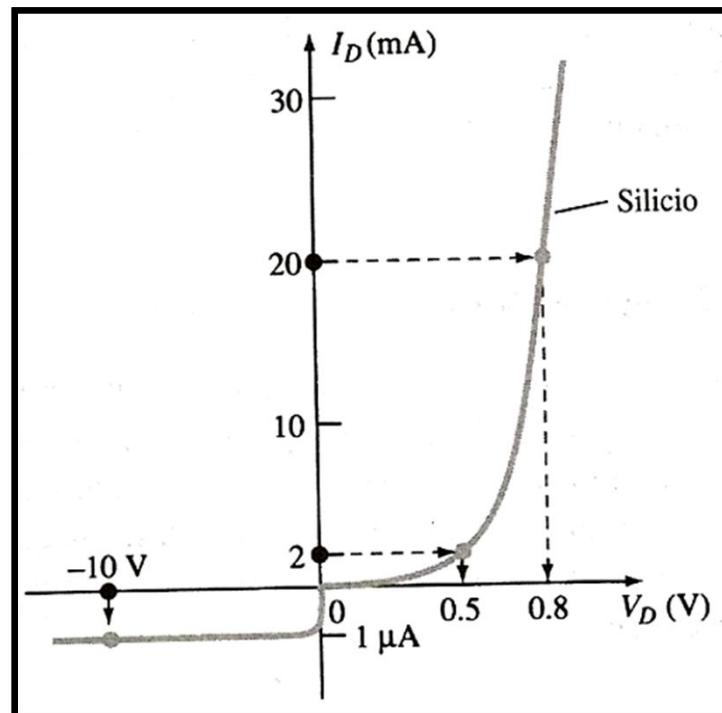
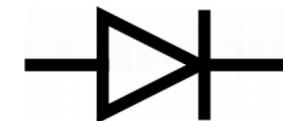


- La *aplicación de un voltaje en cd* a un circuito que contiene un diodo **produce un punto de operación constante**.
- La resistencia del diodo en este punto se halla aplicando la siguiente ecuación:

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



Diodo semiconductor.



Ejemplo:

Determinar los niveles de resistencia de cd del diodo de la figura adjunta, con:

1. $I_D = 2\text{mA}$.
2. $I_D = 20\text{mA}$.
3. $V_D = -10\text{V}$.

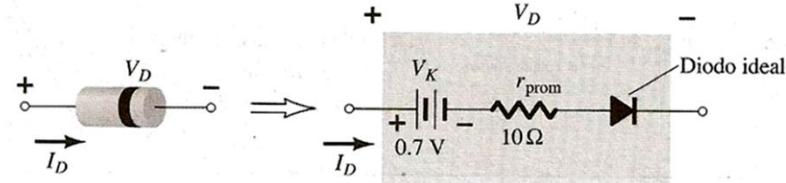
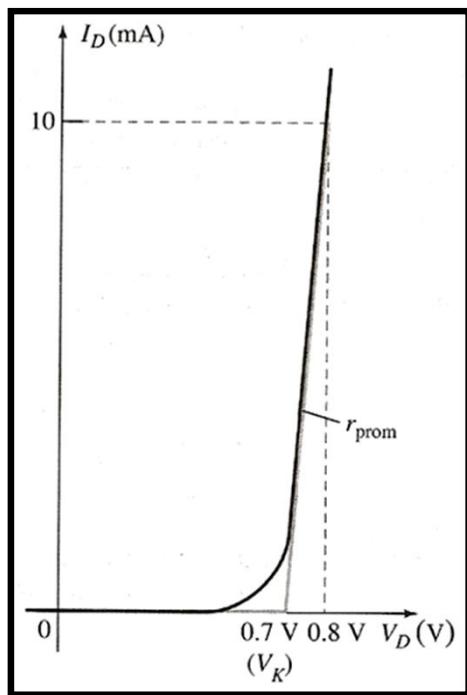
Circuitos equivalentes



- ***Circuito equivalente:*** Es una combinación de elementos apropiadamente seleccionados para que representen mejor las características reales de un dispositivo o sistema en una región de operación particular.
- Existen tres modelos (circuitos equivalentes) del diodo básicos:
 1. Modelo lineal por segmentos.
 2. Modelo simplificado.
 3. Dispositivo ideal.

Modelo lineal por segmentos

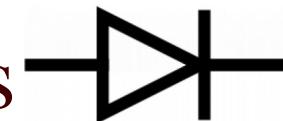
Consiste en simular con más o menos precisión las características del dispositivo mediante segmentos de línea recta.



Consideraciones:

1. Los segmentos de recta no duplican con exactitud las características, sobre todo en el codo.
2. Los segmentos resultantes son suficientemente parecidos a la curva real.
3. En la sección inclinada, la resistencia promedio es el nivel de resistencia del circuito equivalente.
4. El diodo ideal establece que sólo hay una dirección de conducción.
5. La batería especifica que el voltaje a través del dispositivo debe alcanzar el voltaje umbral.

Modelo lineal por segmentos

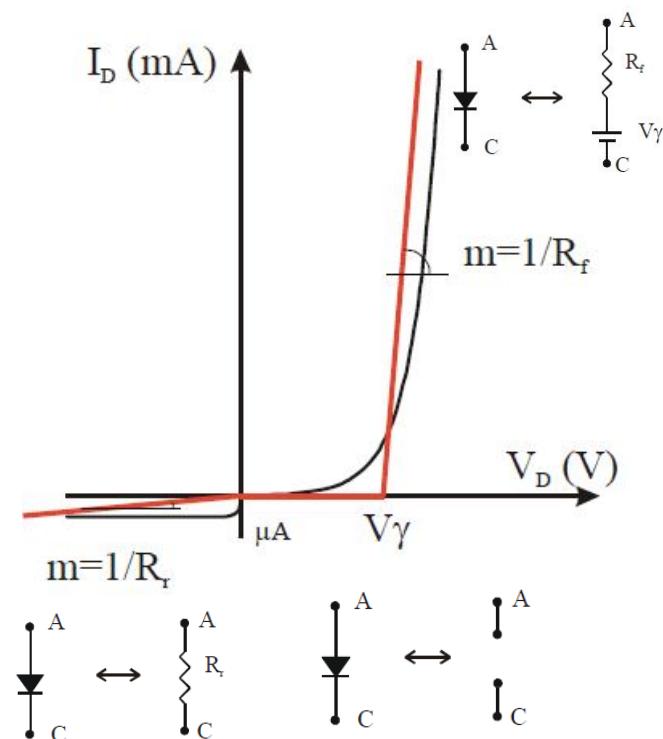


3 zonas de funcionamiento:

$V_D \leq 0$. La curva del diodo es una recta que pasa por el origen con pendiente $1/R_r$, por lo que el diodo se comporta como una resistencia de valor R_r .

$V_D \leq 0 \leq V_y$. El diodo se comporta como un circuito abierto, la corriente a través de él es nula.

$V_D \leq 0 \leq V_y$. En esta zona el diodo se comporta como una recta que corta al eje V en V_y y tiene una pendiente $1/R_f$. En otras palabras, se comporta como una resistencia en serie con una fuente de valor V_y .



Modelo lineal por segmentos

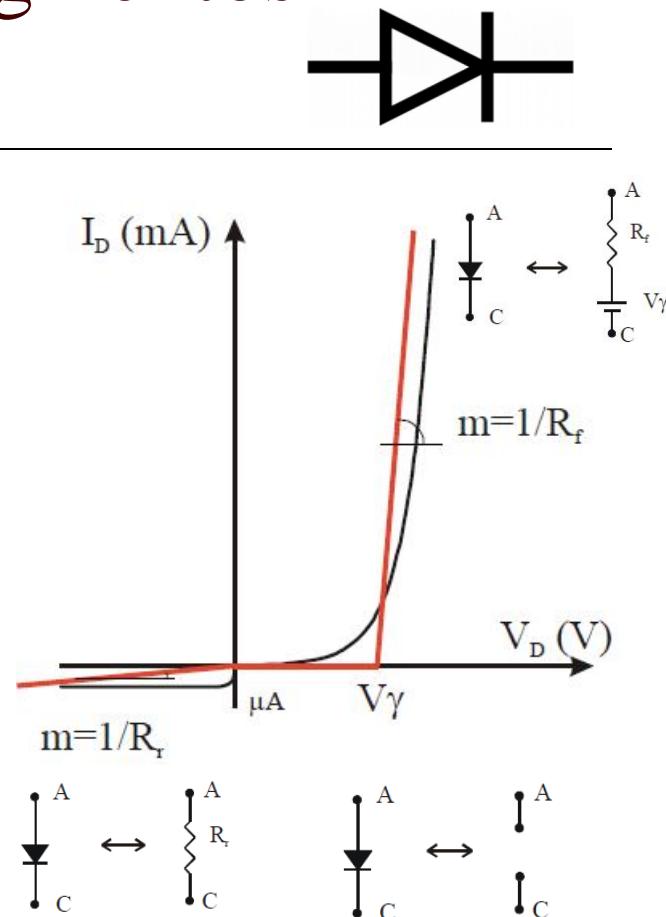
1^a Aproximación

3 zonas de funcionamiento:

$V_D \leq 0$. La curva del diodo es una recta que pasa por el origen con pendiente $1/R_r$, por lo que el diodo se comporta como una resistencia de valor R_r .

$0 \leq V_D \leq V_y$. El diodo se comporta como un circuito abierto, la corriente a través de él es nula.

$V_D \geq V_y$. En esta zona el diodo se comporta como una recta que corta al eje V en V_y y tiene una pendiente $1/R_f$. En otras palabras, se comporta como una resistencia en serie con una fuente de valor V_y .



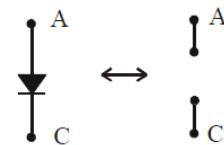
Modelo lineal por segmentos

2^a Aproximación

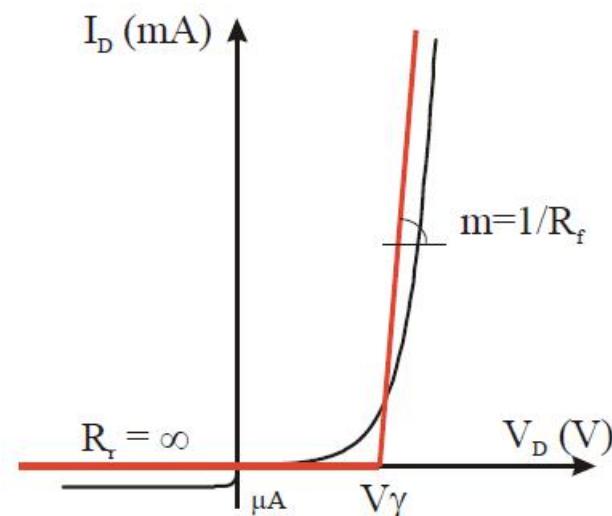
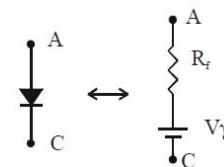


2 zonas de funcionamiento:

$V_D \leq V_y$. El diodo se comporta como un circuito abierto, la corriente a través de él es nula.

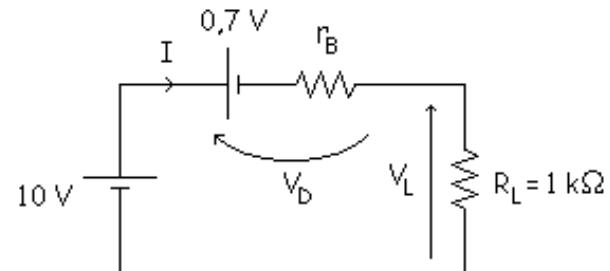


$V_D \geq V_y$. El diodo se comporta de la misma forma que en la 1^a aproximación, por lo que se sustituye al diodo por una resistencia de valor R_f en serie con una fuente de valor V_y .



Modelo lineal por segmentos

□ Ejemplo:



$$r_B = 0,23 \Omega$$

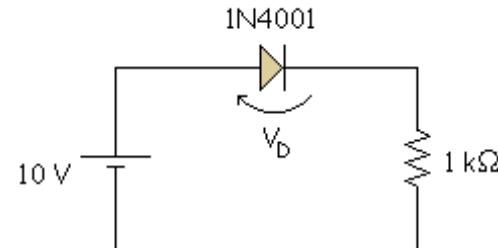
$$\text{malla: } -10 + 0,7 + (1 + 0,23 \cdot 10^{-3}) \cdot I = 0$$

$$I = \frac{10 - 0,7}{1 + 0,23 \cdot 10^{-3}} = 9,3 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,7 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot 9,3 = 0,702 \text{ V} \quad P_D = V_D \cdot I = 0,702 \cdot 9,3 = 6,5286 \text{ mW}$$

$$V_L = 10 - 0,702 = 9,298 \text{ V} \quad P_L = V_L \cdot I = 9,298 \cdot 9,3 = 86,4714 \text{ mW}$$

$$P_T = P_D + P_L = 6,5286 + 86,4714 = 93 \text{ mW}$$

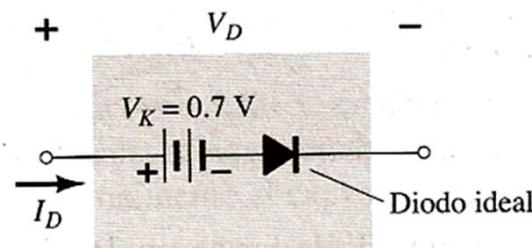
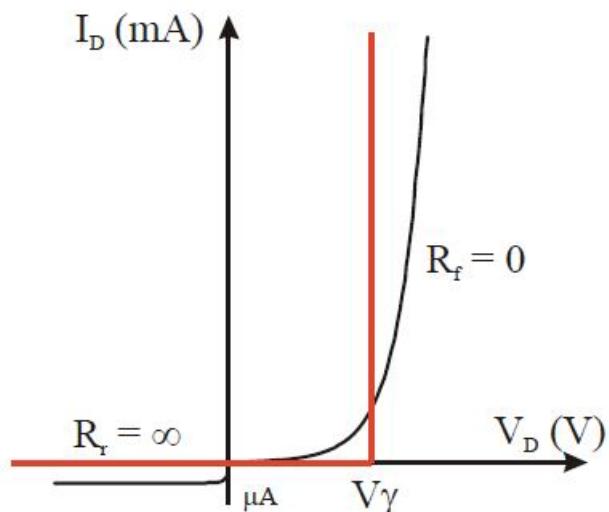




Modelo simplificado



En un diodo de Si polarizado en directa en un sistema electrónico en condiciones de cd experimenta una caída de 0.7V a través de éste en el estado de conducción, a cualquier nivel de corriente en el diodo.



Consideraciones:

La resistencia promedio es suficientemente pequeña para ser ignorada, en comparación con los demás elementos de la red.

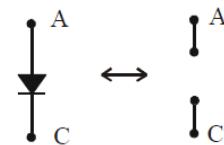


Modelo simplificado

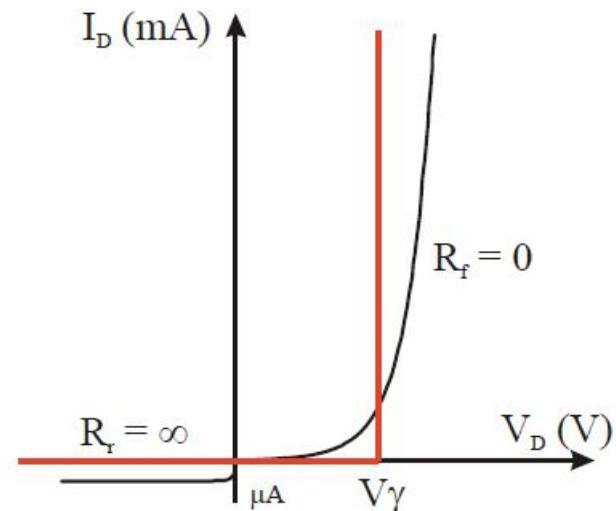
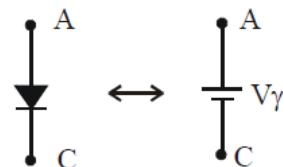


2 zonas de funcionamiento:

$V_D \leq V_y$. El diodo se comporta como un circuito abierto, la corriente a través de él es nula.



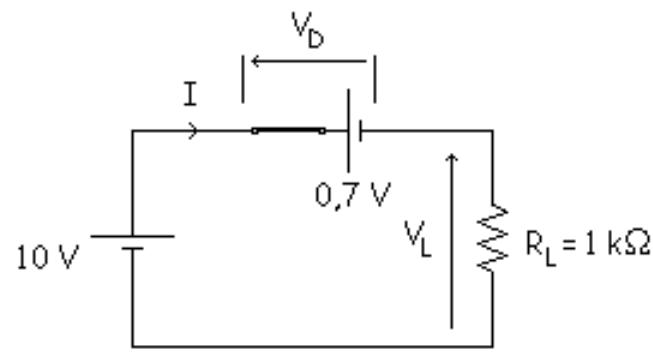
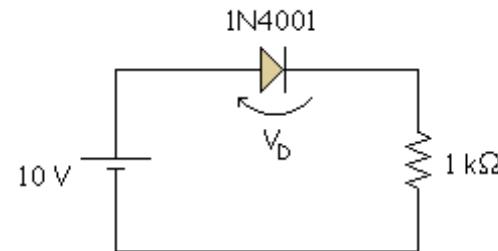
$V_D \geq V_y$. El diodo se comporta como una fuente de valor V_y (lo mismo que en el modelo lineal por segmentos en su segunda aproximación, pero haciendo $R_f = 0$).



Modelo simplificado



□ Ejemplo:



$$\text{malla: } -10 + 0,7 + 1I = 0$$

$$I = \frac{10 - 0,7}{1} = 9,3 \text{ mA}$$

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

$$P_L = V_L \cdot I = 9,3 \cdot 9,3 = 86,5 \text{ mW}$$

$$P_D = V_D \cdot I = 0,7 \cdot 9,3 = 6,51 \text{ mW}$$

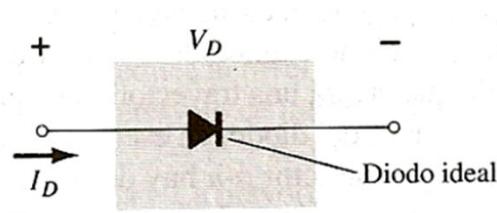
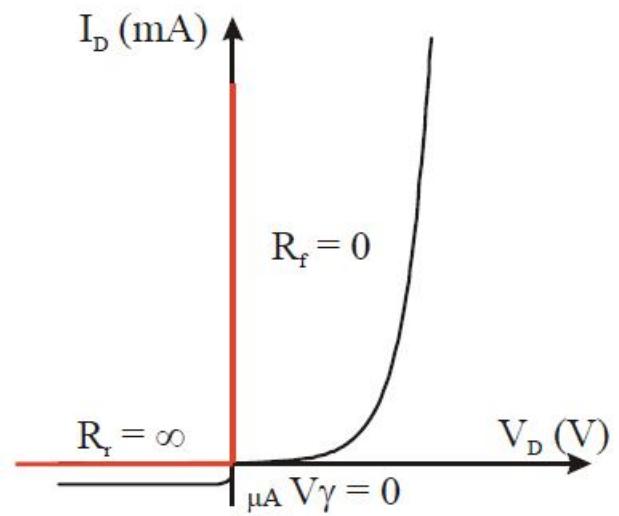
$$P_D + P_L = 6,51 + 86,5 = 93 \text{ mW}$$



Modelo ideal



El circuito está conformado únicamente por un diodo ideal, con sus características.



➤ Consideraciones:

1. Se dice que el nivel de 0.7V puede ser ignorado en comparación con el nivel de voltaje aplicado al sistema.

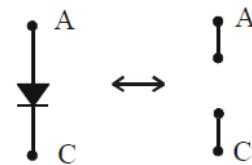


Modelo ideal

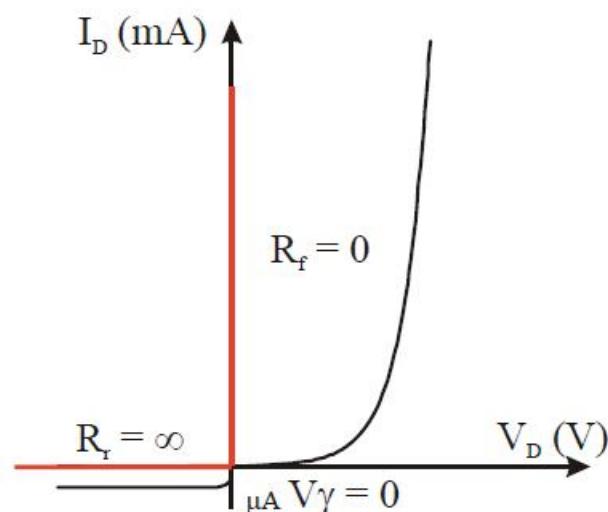
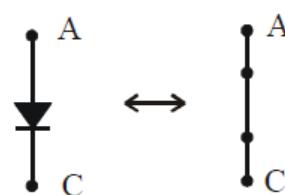


2 zonas de funcionamiento:

$V_D \leq 0$. El diodo se comporta como un circuito abierto, la corriente a través de él es nula.



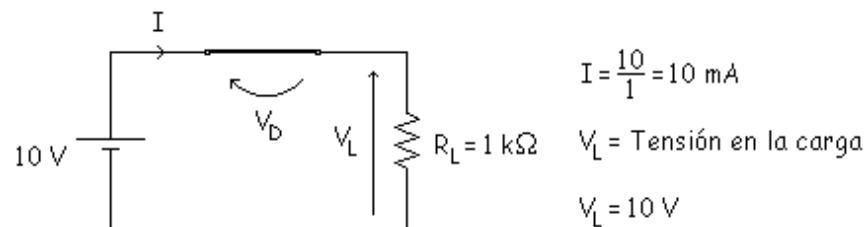
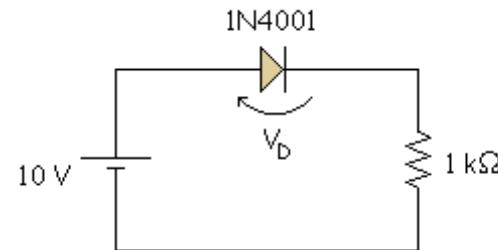
$V_D \geq 0$. El diodo se comporta como una corto circuito, $I_D \rightarrow \infty$.



Modelo ideal



□ Ejemplo:



P_L = Potencia en la carga

$$P_L = V_L \cdot I = 10 \text{ V} \cdot 10 \text{ mA} = 100 \text{ mW}$$

$$P_T = \text{Potencia disipada total} = P_D + P_L = 0 + 100 \text{ mW} = 100 \text{ mW}$$

P_D = Potencia disipada en el diodo

$$P_D = V_D \cdot I = 0 \cdot 10 \text{ mA} = 0 \text{ W}$$

Como elegir una aproximación

- Para elegir que aproximación se va a usar se tiene que tener en cuenta, por ejemplo, si son aceptables los errores grandes, ya que si la respuesta es afirmativa se podría usar la segunda aproximación. Por el contrario, si el circuito contiene resistencias de precisión de una tolerancia de 1%, puede ser necesario utilizar la primera aproximación. Pero en la mayoría de los casos la segunda aproximación será la mejor opción.
- La ecuación que utilizaremos para saber que aproximación se debe utilizar es esta:

$$I_F = \frac{V_S - 0,7}{R_L + r_B}$$

Como elegir una aproximación

- Fijándonos en el numerador se ve que se compara la V_S con 0.7 V. Si V_S es igual a 7 V, al ignorar la barrera de potencial se produce un error en los cálculos del 10 %, si V_S es 14 V un error del 5 %, etc...
- Si se ve el denominador, si la resistencia de carga es 10 veces la resistencia interna, al ignorar la resistencia interna se produce un error del 10 % en los cálculos. Cuando la resistencia de carga es 20 veces mayor el error baje al 5 %, etc...

V_S	Diodo ideal
3,5 V	20 %
7 V	10 %
14 V	5 %
28 V	2,5 %
70 V	1 %

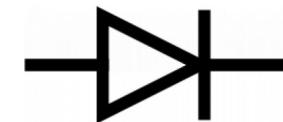
$\frac{R_L}{r_B}$	Primera o segunda aproximación
5	20 %
10	10 %
20	5 %
40	2,5 %
100	1 %

Como elegir una aproximación

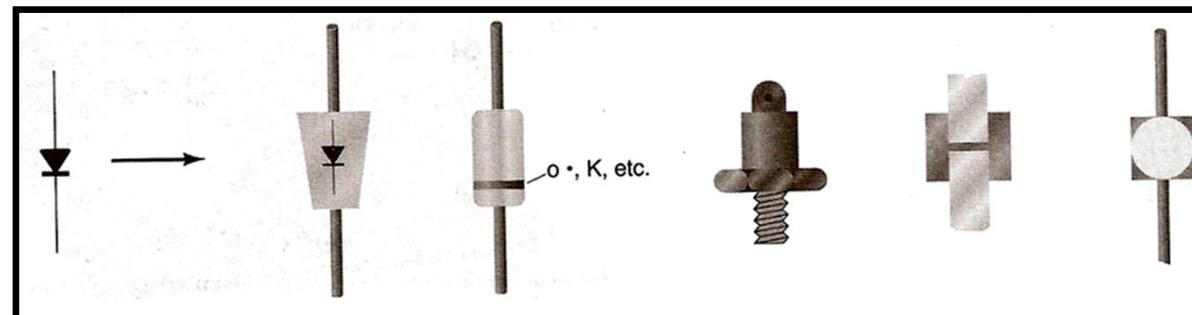
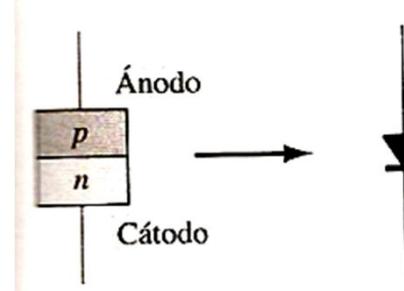
- En la mayoría de los diodos rectificadores la resistencia interna es menor que 1 W, lo que significa que la segunda aproximación produce un error menor que el 5 % con resistencias de carga mayores de 20 W. Por eso la segunda aproximación es una buena opción si hay dudas sobre la aproximación a utilizar.



Diodo semiconductor.

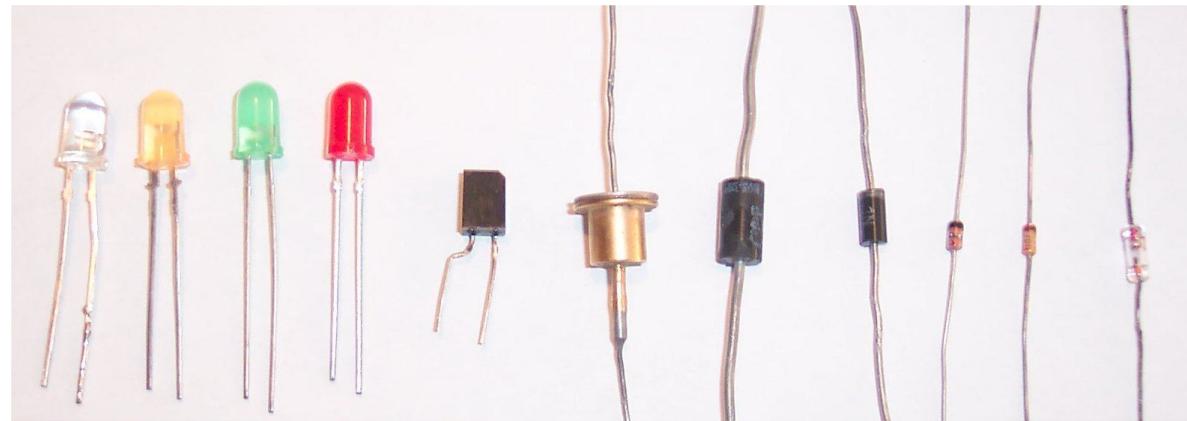
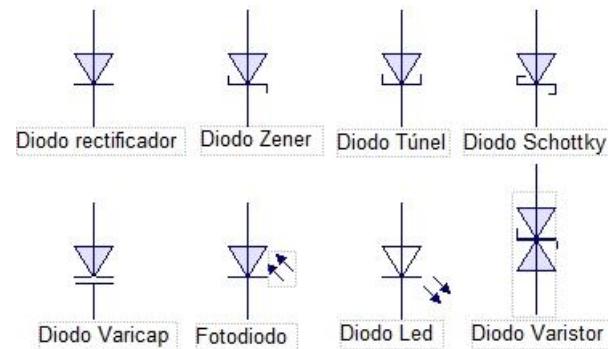


- Notación para diodos semiconductores. En la mayoría de los diodos, cualquier marca ya sea *un punto o una banda*, aparece en *el cátodo*.



Diodo semiconductor.

Varios tipos de diodos.

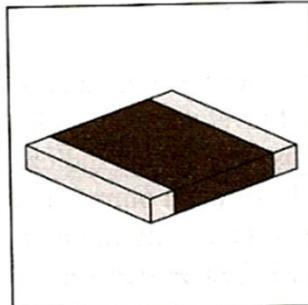


Diodo semiconductor.

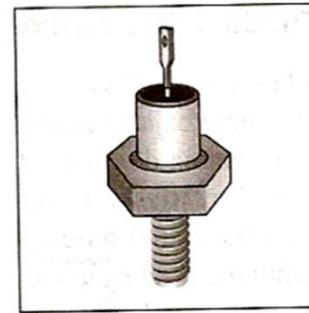
Varios tipos de diodos.



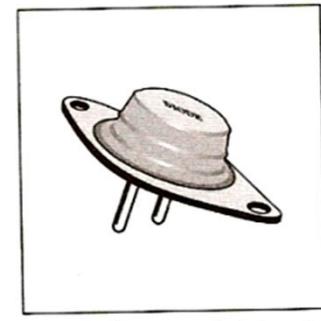
Diodo para propósito general



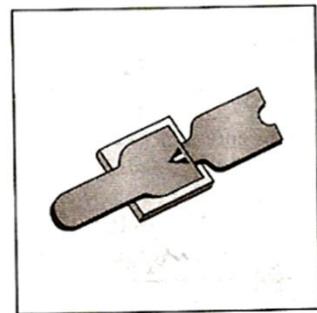
Diodo PIN de alta potencia
de montaje superficial



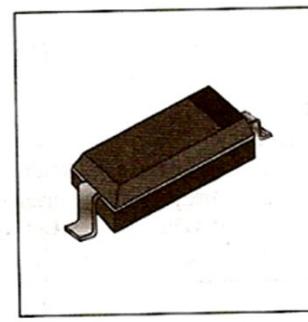
Diodo de potencia (vástago)



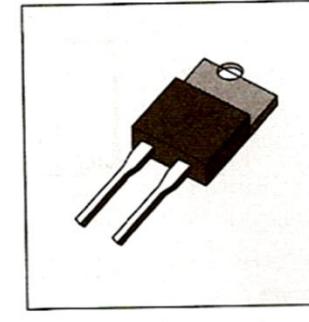
Diodo de potencia (plano)



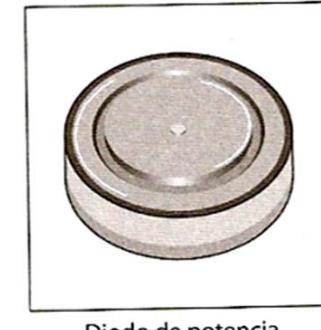
Diodo de punta con conexión
de haz



Diodo de montaje
superficial de chip plano



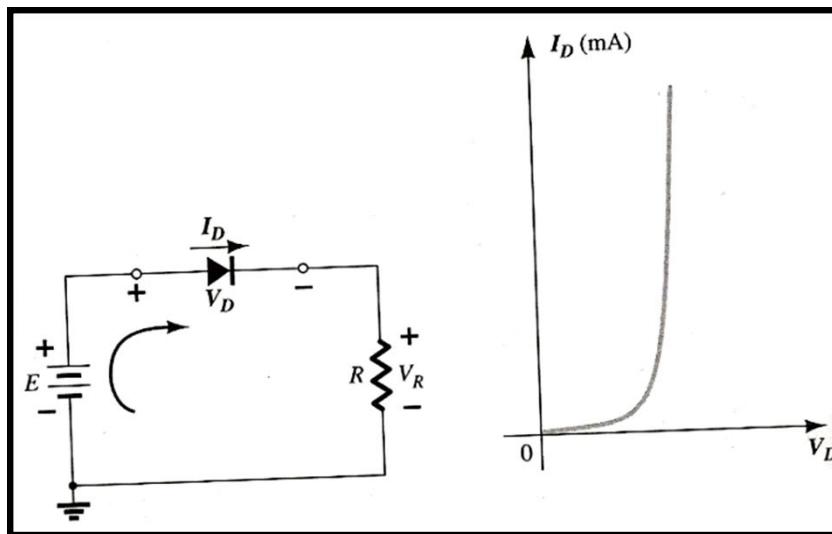
Diodo de potencia



Diodo de potencia
(cápsula en forma de disco)

Aplicaciones del Diodo

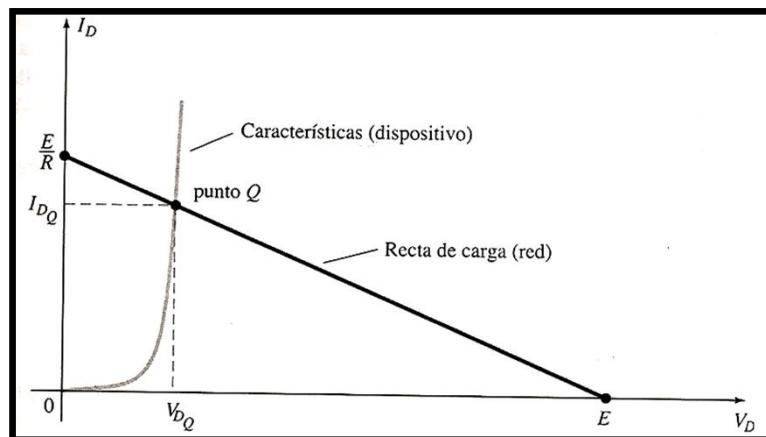
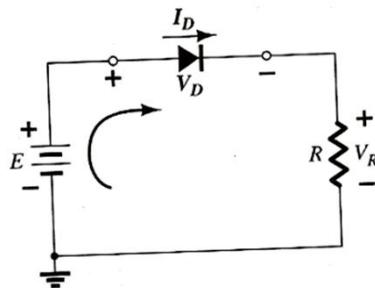
Análisis por recta de carga



Consideraciones:

1. Es la forma más sencilla de las configuraciones del diodo.
2. La solución se reduce a determinar los niveles de corriente y voltaje que satisfacen, al mismo tiempo, tanto las características del diodo como los parámetros de la red.

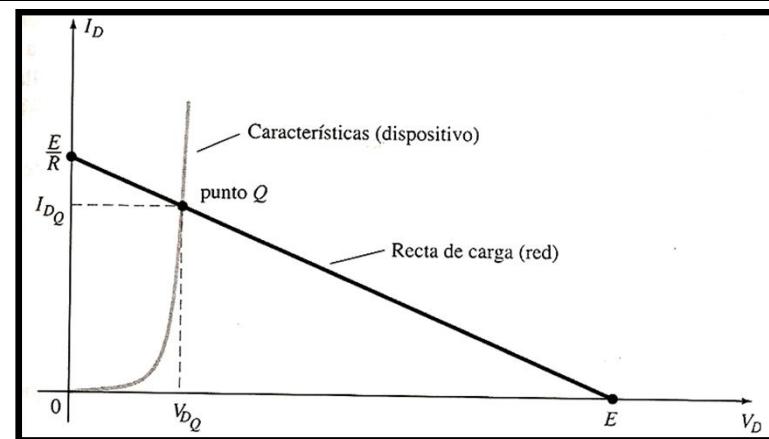
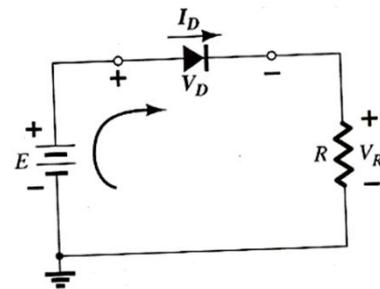
Análisis por recta de carga



➤ Consideraciones:

1. Las características del diodo se colocan en el mismo sistema de ejes con una línea recta definida por los parámetros de la red.
2. Esta línea se conoce como ***recta de carga***.
3. La intersección de las dos curvas definirá la solución para la red, así como los niveles de corriente y voltaje.

Análisis por recta de carga

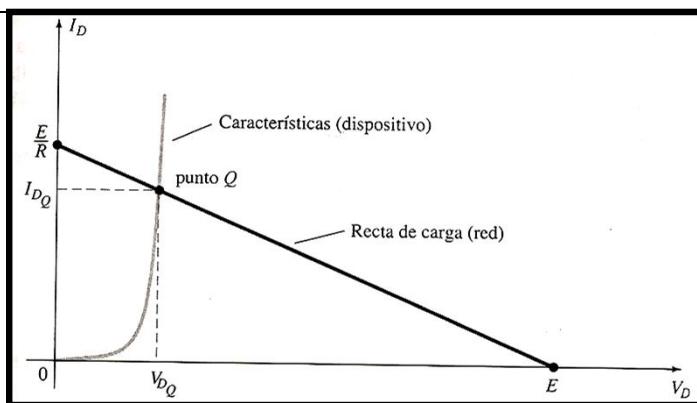


➤ Aplicando leyes de Kirchhoff:

$$E - V_D - V_R = E - V_D - I_D R = 0$$

$$E = V_D + I_D R$$

Análisis por recta de carga

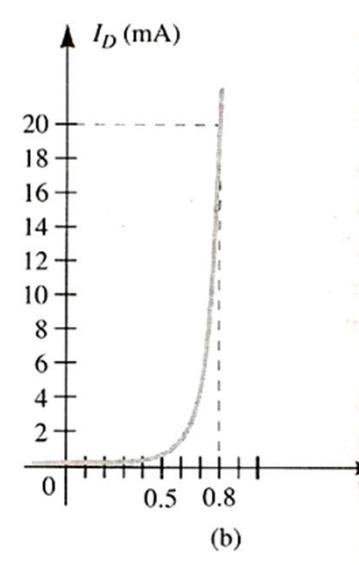
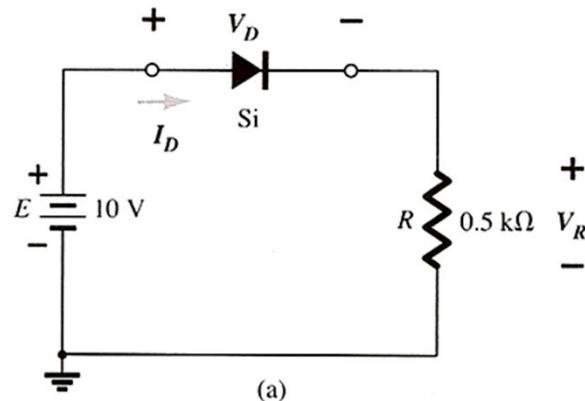


- La intersección de la recta de carga con las características se determina sabiendo que en cualquier parte del eje horizontal $I_D=0A$ y en cualquier parte del eje vertical $V_D = 0V$, por tanto:

$$I_D = \frac{E}{R} \Big|_{V_D=0V} \quad V_D = E \Big|_{I_D=0A}$$

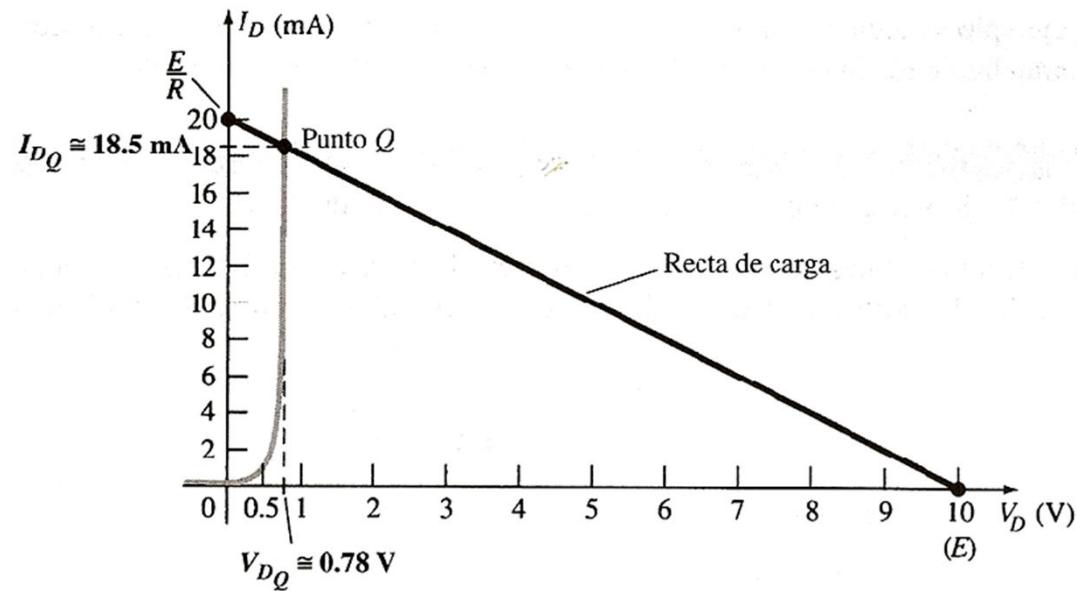
Análisis por recta de carga

- Ejemplo 1: Determinar V_{DQ} , I_{DQ} y V_R .



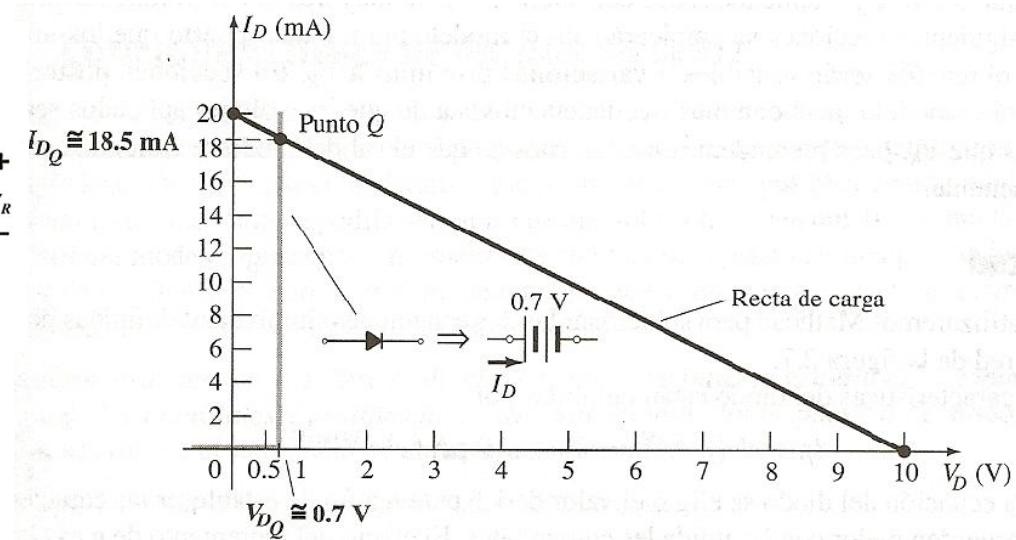
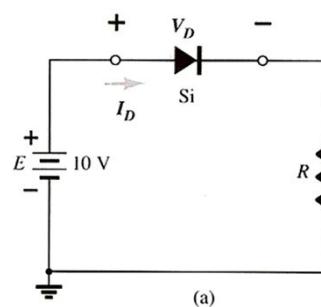
Análisis por recta de carga

□ Solución:



Análisis por recta de carga

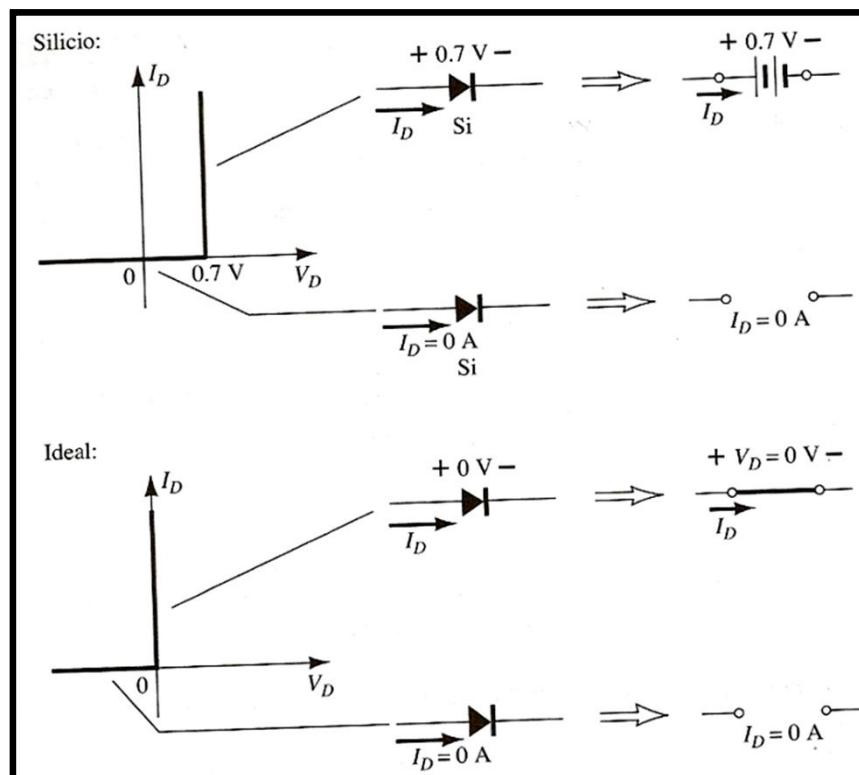
- Ejemplo 2: Repetir el ejemplo 1 utilizando el modelo equivalente aproximado del diodo semiconductor de SI.





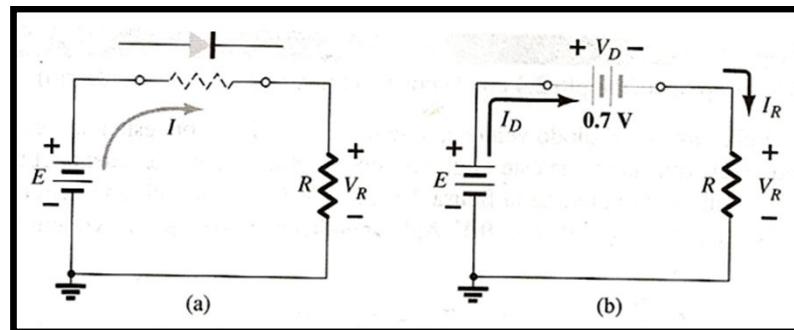
Configuraciones del diodo.

- Modelo aproximado e ideal del diodo semiconductor:



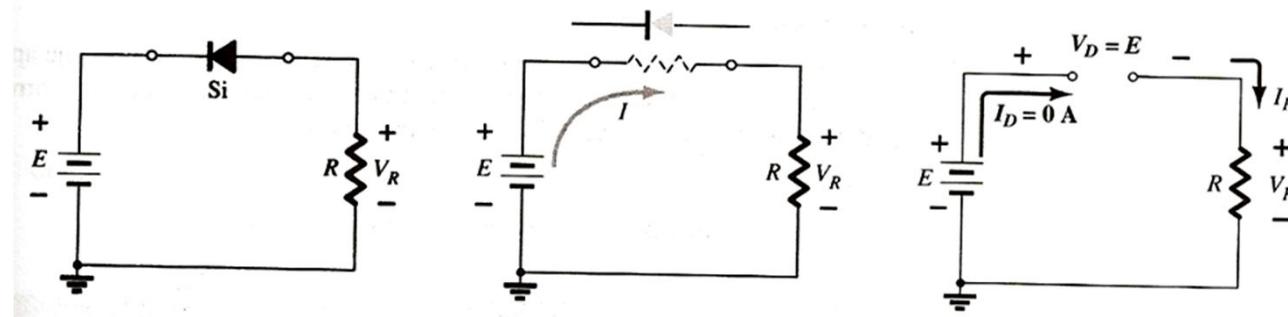
Configuraciones en serie y paralelo

- **Procedimiento general:** para cada configuración primero se tiene que investigar el estado de cada diodo. ¿Cuáles están encendidos y cuales apagados? Hecho esto, se sustituye el equivalente apropiado y se determinan los parámetros de la red.
- **Un diodo está encendido** si la corriente establecida por las fuentes aplicadas es tal que su dirección concuerda con la de la flecha del símbolo del diodo y $VD \geq 0.7V$ para Si.
- La descripción es válida si el voltaje de la fuente es mayor que el voltaje de encendido (V_K) del diodo.



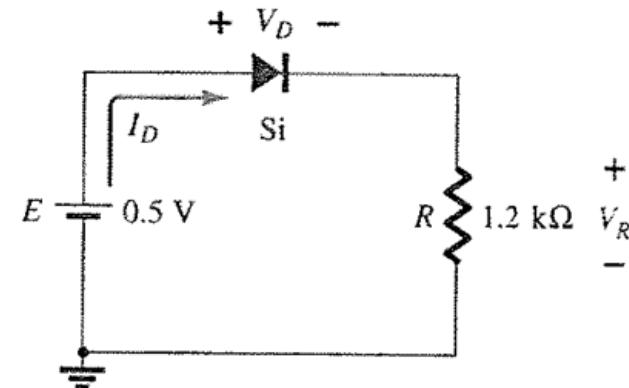
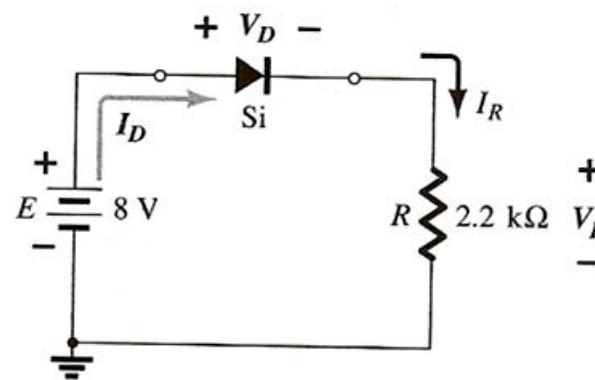
Configuraciones en serie y paralelo

- Con el diodo invertido se tiene:



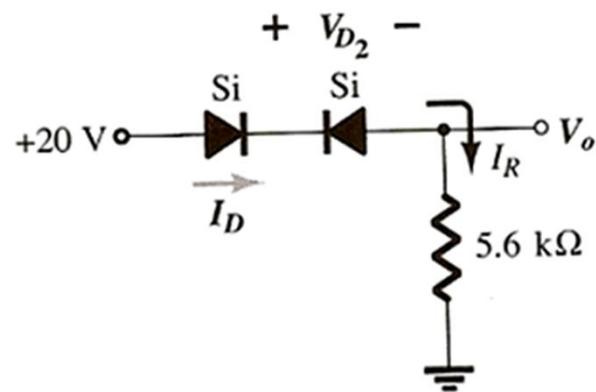
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar V_D , V_R e I_D . (Utilizando el método de la recta de carga y el modelo simplificado)



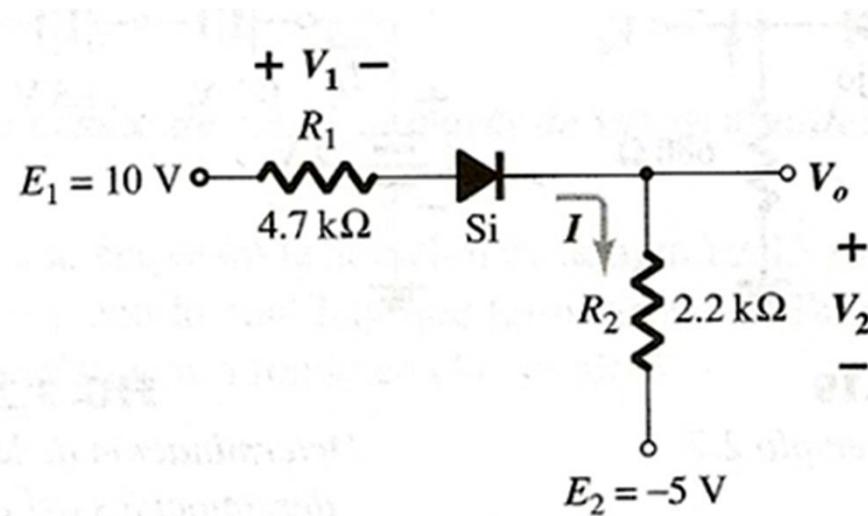
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar V_{D2} , V_o e I_D .



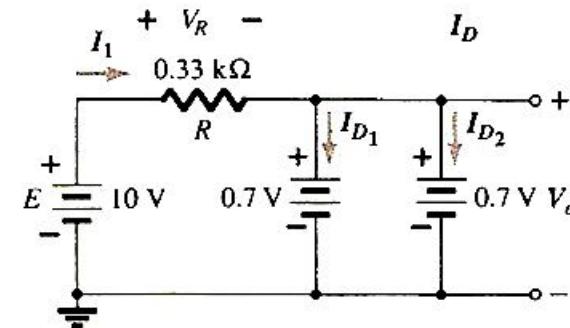
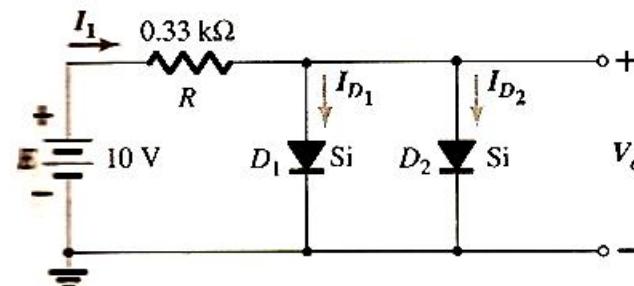
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar V_1 , V_2 , V_o e I .



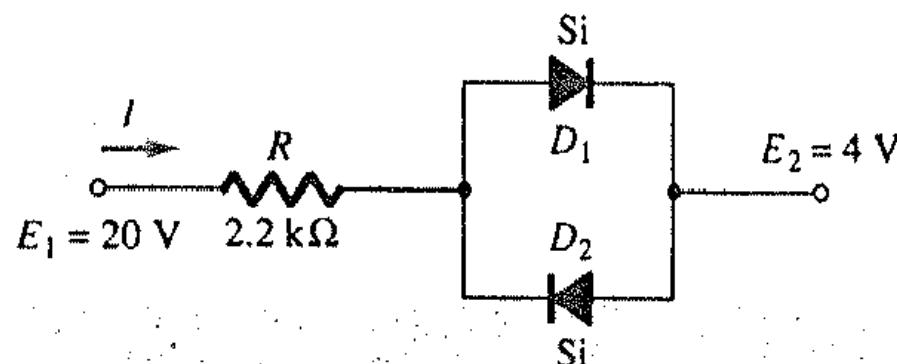
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar I_1 , I_{D1} , I_{D2} , V_o .



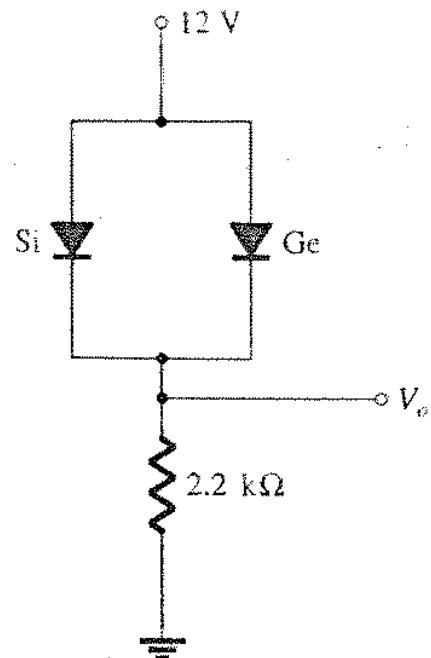
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar I , V_R .



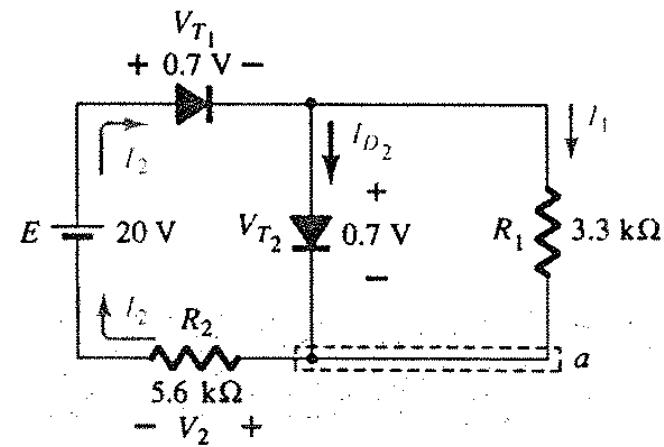
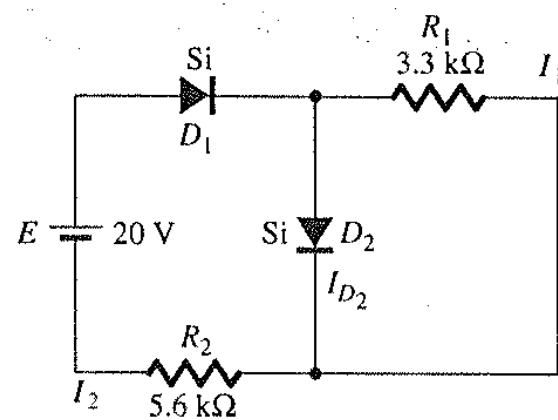
Configuraciones en serie y paralelo

- Determinar I_R , V_0 .



Configuraciones en serie y paralelo

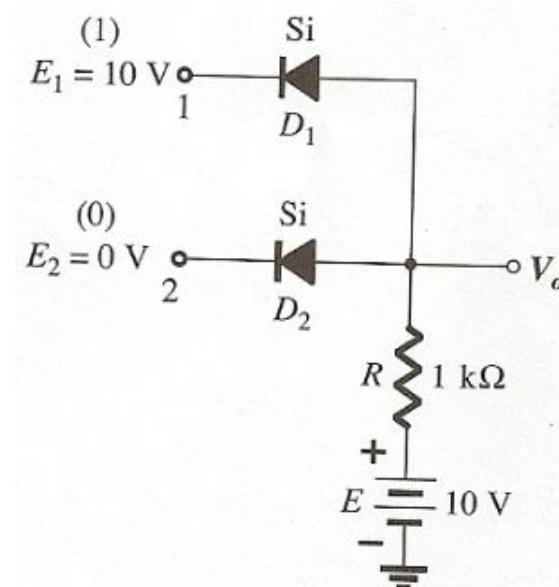
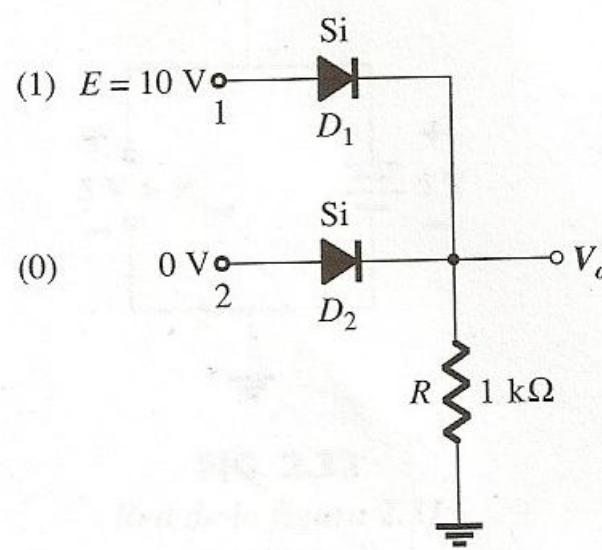
- Determinar I_1 , I_2 , I_{D2} , V_1 , V_2 .



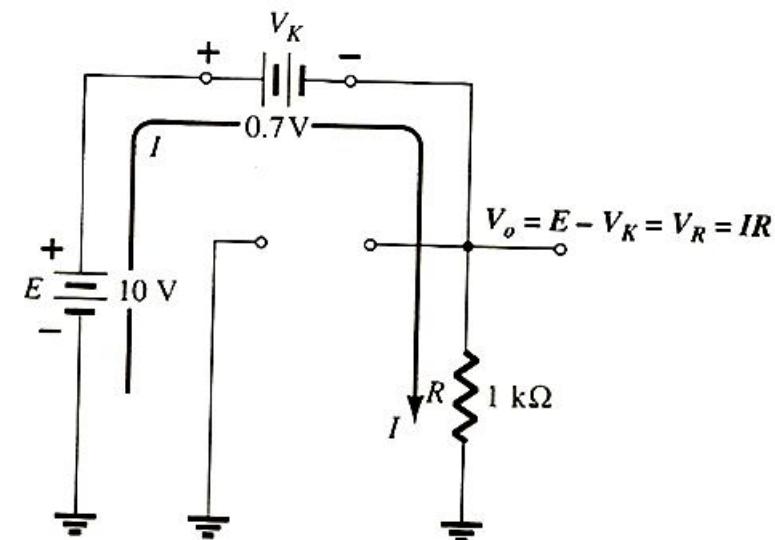
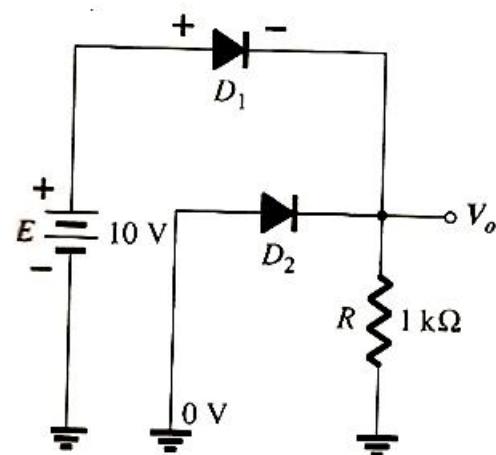
Compuertas AND/OR.

Compuertas AND/OR

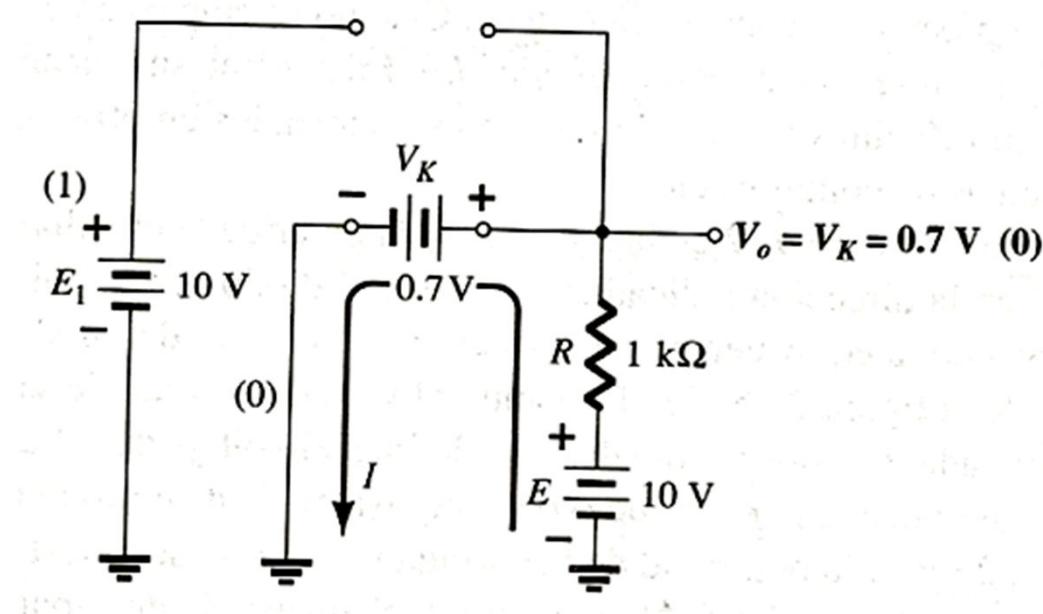
- Determinar V_o .



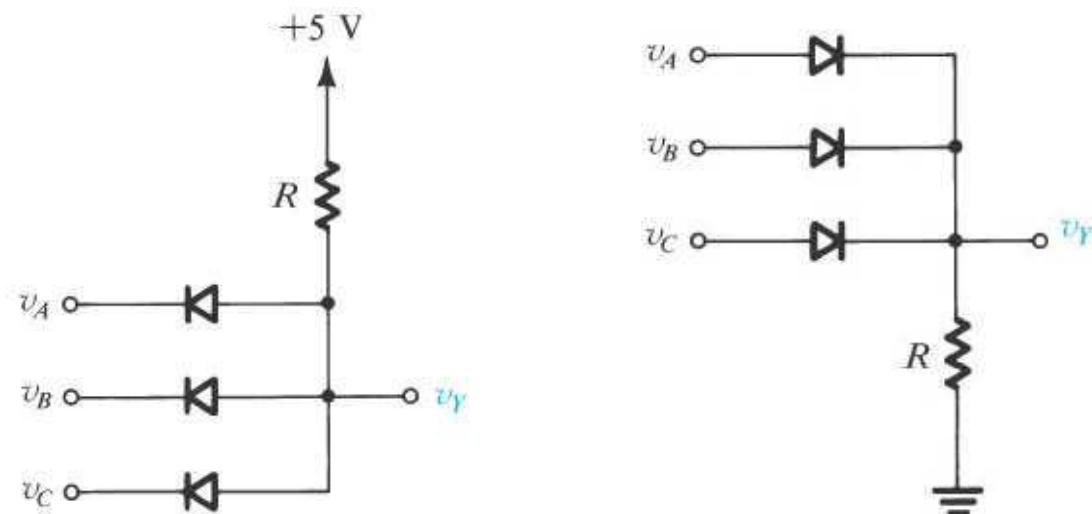
Compuertas AND/OR



Compuertas AND/OR



Compuertas AND/OR



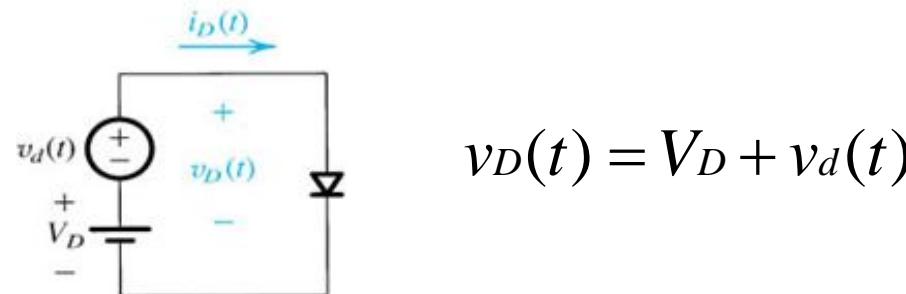
Analisis de pequeña señal

Análisis de pequeña señal

- Hay aplicaciones en las que el diodo se polariza con una tensión continua en un punto de trabajo en la zona de conducción, y sobre ese punto **se superpone una señal alterna** de amplitud tal que no provoca un cambio en la zona de funcionamiento del diodo, osea el diodo permanece en la zona de plena conducción.
- **Pequeña señal.** Si la amplitud de la señal de ac de salida no está distorsionada o si su amplitud de entrada es lo suficientemente pequeña como para que la curva del diodo sea lineal en ese tramo.
- Para esto primero se debe determinar el punto de operación del diodo (V_D e I_D), normalmente se utiliza el modelo simplificado del diodo (diodo considerado como una fuente fija de 0.7V).

Análisis de pequeña señal

- Para la operación de la pequeña señal el diodo se modela por una resistencia de valor igual **al inverso de la pendiente de la recta tangente a la curva característica del diodo** en tal punto de operación.
- El circuito conceptual y su ecuación inicial son los siguientes:



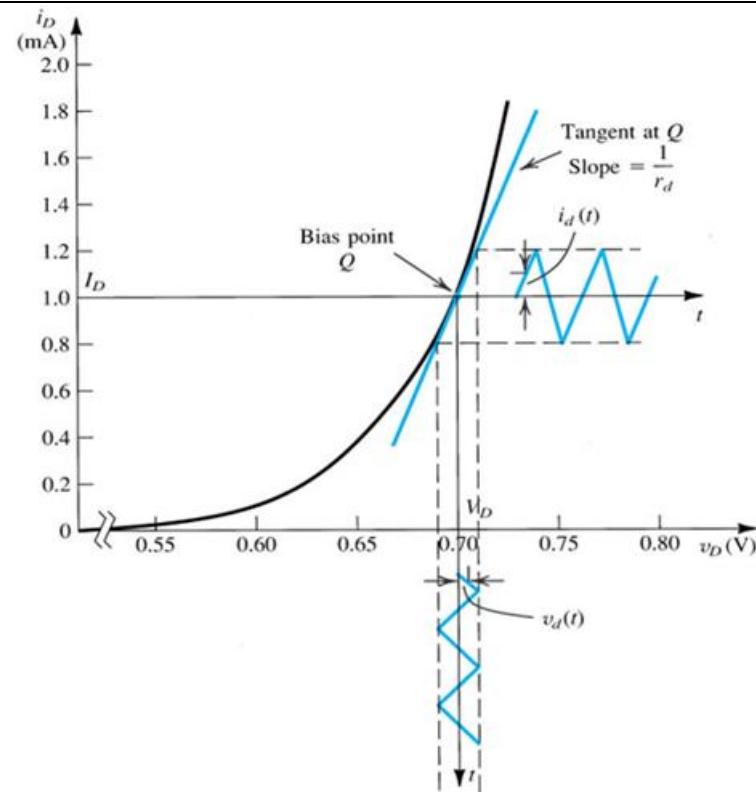
- Donde:
 - $v_D(t)$ voltaje total instantáneo del diodo
 - V_D voltaje de dc
 - $v_d(t)$ señal de ac triangular superpuesta a la señal de dc

Análisis de pequeña señal

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{v_D(t)}{nV_T}}$$

- Donde:
 - $i_D(t)$ corriente total instantánea
 - $v_D(t)$ voltaje total instantáneo
- Sustituyendo el voltaje instantáneo en la ecuación de corriente instantánea queda:

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{(V_D + v_d(t))}{nV_T}}$$



Análisis de pequeña señal

- Desarrollando la ecuación anterior:

$$i_D(t) = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{nV_T}} \cdot e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}}$$
$$i_D(t) = I_D \cdot e^{\frac{v_d(t)}{nV_T}}$$

- Si $v_d(t)$ es lo suficientemente pequeña como para que $v_d/nV_T \ll 1$ entonces se puede expandir la ecuación anterior en su forma de serie, tomando únicamente los dos primeros términos:

$$i_D(t) \cong I_D \left(1 + \frac{v_d}{nV_T} \right)$$

Análisis de pequeña señal

- Esta es la **aproximación de pequeña señal**, válida para amplitudes menores a 10mV y 5mV para $n = 2$ y $n = 1$ respectivamente.
- Desarrollando esta aproximación obtenemos:

$$i_D(t) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} v_d$$

- Considerando que a la corriente de dc I_D se le superpone una señal de ac proporcional al voltaje v_d , esto es:

$$i_D = I_D + i_d$$

- Se podría deducir que:

$$i_d = \frac{I_D}{nV_T} v_d$$

Análisis de pequeña señal

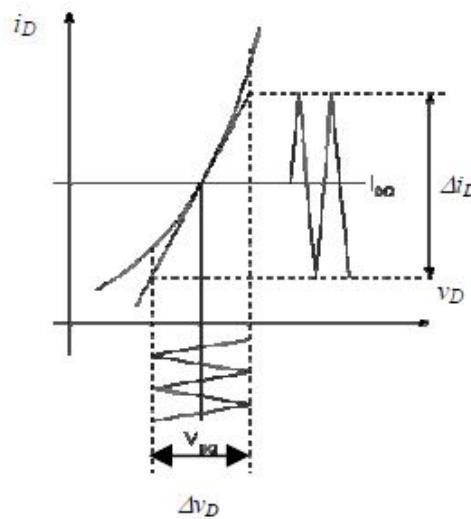
- De donde podemos deducir que el término que relaciona la corriente y el voltaje es una conductancia, llamada **conductancia de diodo de pequeña señal**.
- El inverso de esta es la **resistencia del diodo de pequeña señal**, también llamada **resistencia incremental** o **resistencia dinámica**.

$$r_d = \left. \frac{nV_T}{I_D} \right|_{n=1} \approx \frac{25mV}{I_D}$$

- **Resistencia dinámica, r_d .** La que se presenta en el diodo ante una señal alterna.

Análisis de pequeña señal

- Gráficamente podemos considerar la resistencia dinámica como **el inverso de la pendiente de la recta tangente** a la curva del diodo en el punto de operación, punto Q.



$$\Delta i_D = \frac{di_D}{dv_D} \Delta v_D$$

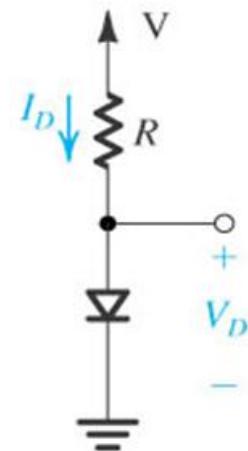
$$r_d = 1 / \frac{di_D}{dv_D}$$

Análisis de pequeña señal

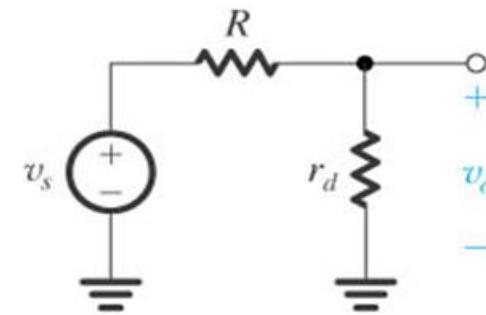
- Los circuitos en los cuales las excitaciones son suma de una componente continua y otra alterna de pequeña amplitud se resuelven aplicando el principio de superposición, partiendo de la hipótesis de que el diodo estará en una de la zonas de funcionamiento y no sale de la misma por efecto de la señal de alterna.
- Este consiste en:
 1. Análisis DC del circuito: Se cortocircuitan las fuentes de alterna y se determina el punto de operación del diodo.
 2. Si el diodo está en conducción, se determina la resistencia dinámica del diodo utilizando los datos del punto de trabajo.
 3. Se cortocircuitan las fuentes de continua y se realiza el análisis del circuito de alterna sustituyendo el diodo por su resistencia dinámica. De ese modo se obtiene el modelo equivalente en pequeña señal que permite determinar las variaciones que se producen en el diodo.

Análisis de pequeña señal

Paso 1:

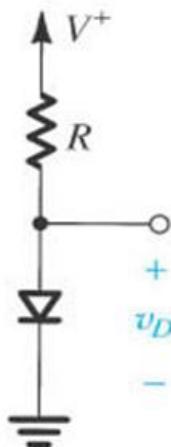


Paso 3:



Análisis de pequeña señal

Para el circuito de la figura $R = 10k\Omega$, V^+ tiene un componente de dc de 10V con una señal senoidal superpuesta de 1 Vpico y 60Hz de frecuencia. Calcule el voltaje de dc del diodo y la amplitud de la señal senoidal a través de él. Considere un diodo con caída de 0.7V a una corriente de 1mA y $n = 2$.

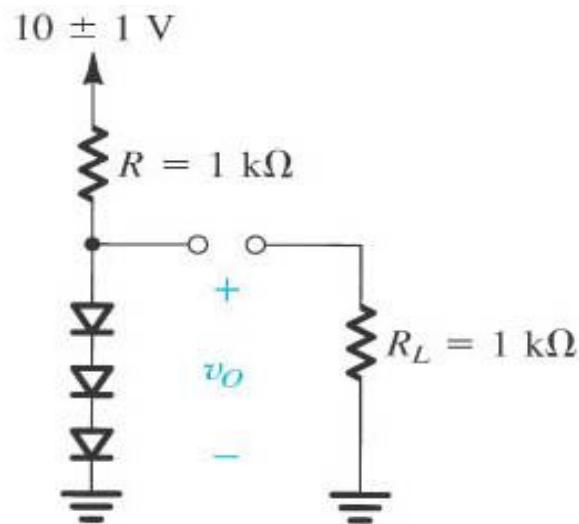


$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{2 \times 25}{0.93} = 53.8\Omega$$

$$v_{dp} = V_{sp} \frac{r_d}{R + r_d} = 1 \frac{53.8}{10000 + 53.8} = 5.35mV$$

Análisis de pequeña señal

En el circuito de la figura los 3 diodos en serie mantienen una caída de tensión constante de 2.1V. Calcule el porcentaje de cambio de este voltaje regulado provocado por: a) una variación en la fuente de alimentación de $\pm 10\%$ y b) una resistencia de carga $R_L = 1\text{k}\Omega$. Asuma $n = 2$.



Análisis de señal de ac

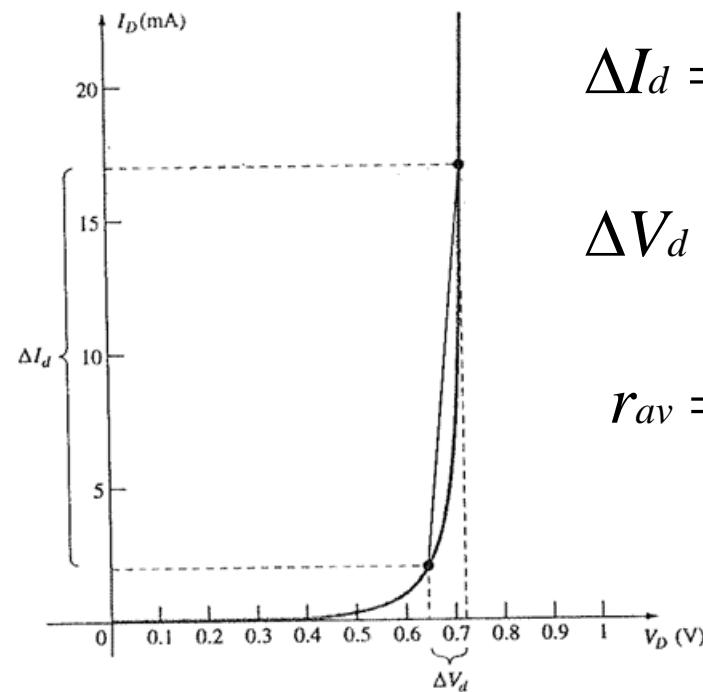
Si la señal de entrada es lo suficientemente grande para producir una excusión amplia, la resistencia asociada con el diodo para esta región se denomina *resistencia de ac promedio*.

Resistencia de ac promedio, r_{av} . La resistencia determinada por una línea recta trazada entre las dos intersecciones establecidas por los valores mínimos y máximos del voltaje de entrada

$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \Big|_{punto_por_punto}$$

Análisis de señal de ac

Determinar la resistencia de ac promedio de acuerdo a la gráfica mostrada.



$$\Delta I_d = 17\text{mA} - 2\text{mA} = 15\text{mA}$$

$$\Delta V_d = 0.725V - 0.65V = 0.075V$$

$$r_{av} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.075V}{15mA} = 5\Omega$$

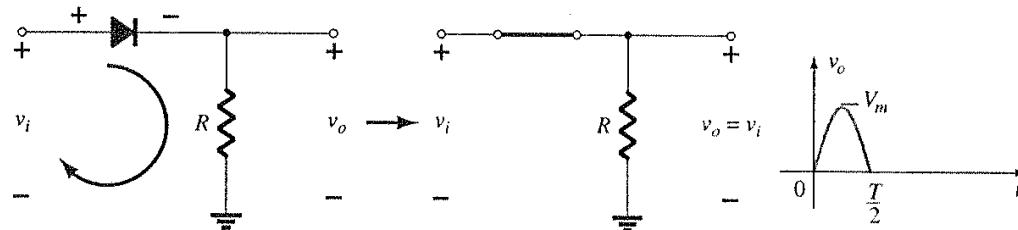
Rectificadores

Rectificadores

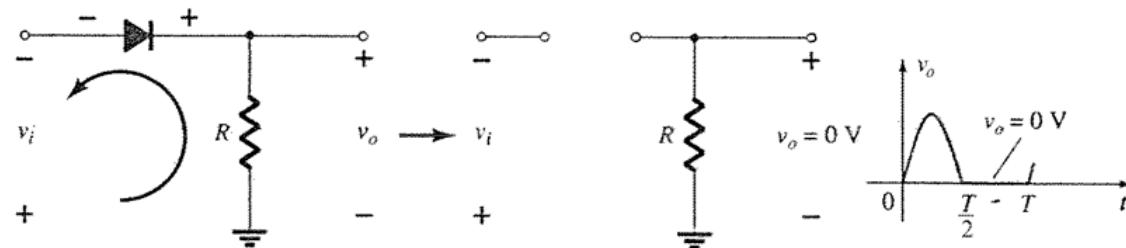
- **Circuitos Rectificadores:** convierten la corriente alterna en corriente continua (unidireccional). También se conocen como convertidores AC-DC
- Tipos:
 - Rectificadores de media onda
 - Rectificadores de onda completa
 - Con transformador con derivación central (dos diodos).
 - Con puente de diodos (cuatro diodos).
- Cuando un diodo se utiliza en el proceso de rectificación se le llama comúnmente **rectificador**, y sus valores nominales de corriente y potencia son normalmente más altos.

Rectificador de media onda

- Cuando la tensión es positiva (intervalo $0 < t < T/2$), el diodo se encuentra polarizado en directa, y conducirá la corriente (caída de 0.7 V).

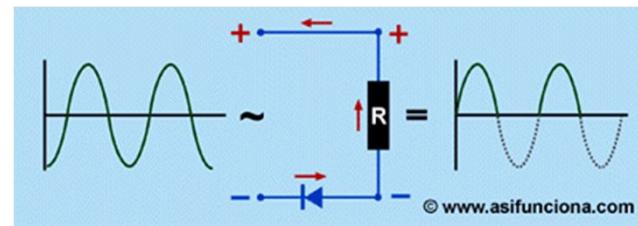
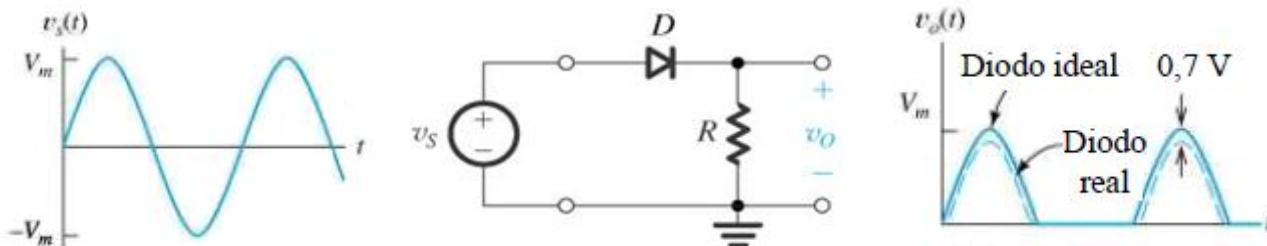


- Cuando la tensión es negativa ($T/2 < t < T$), el diodo se polariza inversamente, no dejando pasar corriente. En este intervalo el diodo soporta la tensión inversa impuesta por la entrada.



Rectificador de media onda

- Aplicando la 2^a Ley de Kirchhoff a los dos casos anteriores se obtiene:
 - En directa, prácticamente la tensión de la alimentación está presente en la carga.
 - En inversa, la caída de tensión la acapara el diodo dado que no circula corriente.



Rectificador de media onda

- La tensión de entrada es senoidal $v_s = V_m \operatorname{sen} \omega t$
- Para esta, el valor promedio (la suma algebraica de las áreas por encima y por debajo del eje) es cero.
- El valor medio de la tensión de salida se obtiene integrando:

$$V_{o(DC)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v_o d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_m \operatorname{sen}(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_{o(DC)} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318V_m$$

- Para un caso más real del diodo, la tensión media de salida quedaría como:

$$V_{o(DC)} = 0.318(V_m - V_T)$$

Rectificador de media onda

- La corriente media en una carga resistiva R se obtiene mediante la ley de Ohm.
- La tensión eficaz será:

$$V_{o(rms)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m^2 \operatorname{sen}^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{V_m}{2} = 0.5V_m$$

- Para un caso más real del diodo, la tensión eficaz de salida quedaría como:

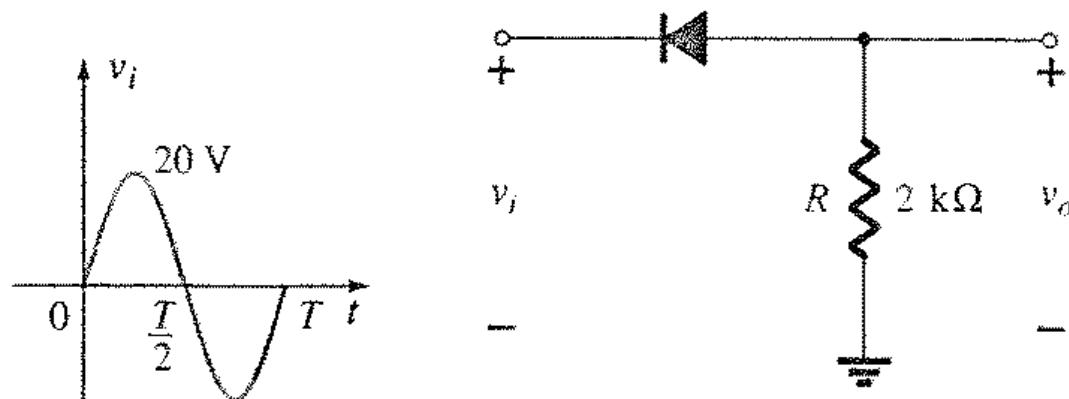
$$V_{o(rms)} = 0.5(V_m - V_T)$$

- La frecuencia de salida es igual a la de entrada.
- Es importante hacer notar que el voltaje aplicado a la entrada del circuito rectificador debe ser menor o igual que el voltaje pico inverso PIV (o PRV) del diodo, de manera que $PIV \geq V_m$.

Rectificador de media onda

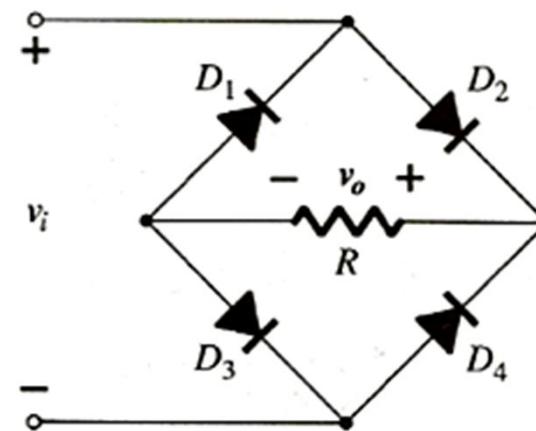
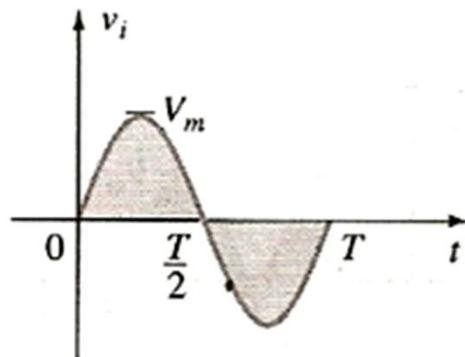
□ Para el circuito de la figura:

- Dibuje la salida V_o y determine el valor medio y eficaz de la salida.
- Repita el inciso anterior si el diodo ideal se reemplaza por uno de silicio.
- Repita los incisos anteriores si V_m se incrementa a 200V y compare las soluciones.



Rectificador de onda completa

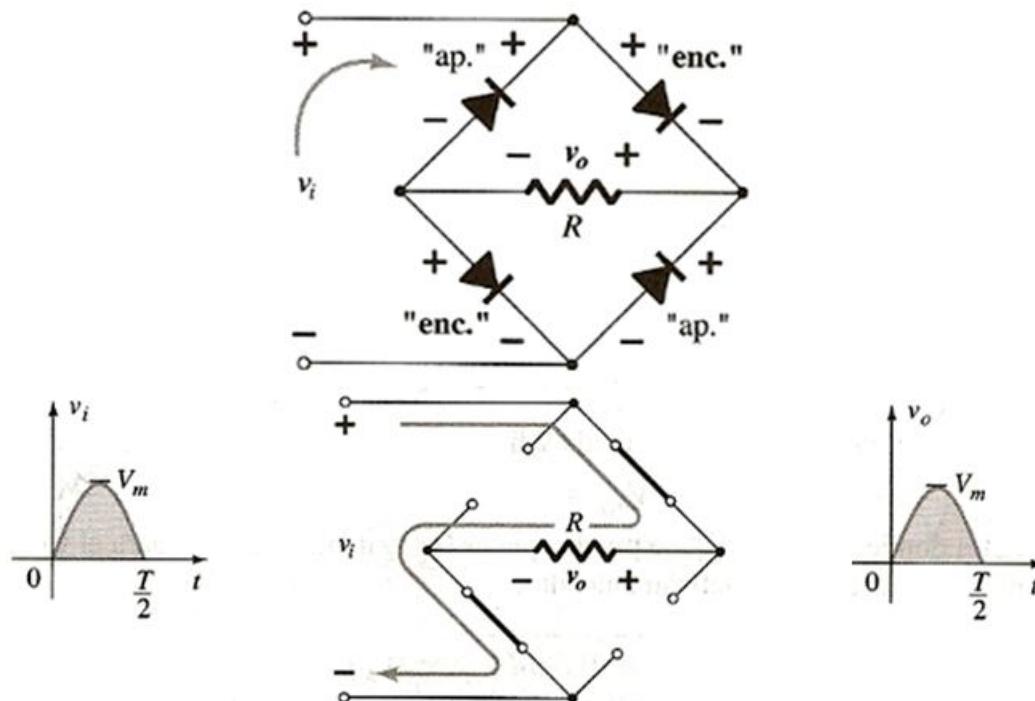
Puente de diodos.



Rectificador de onda completa

Puente de diodos.

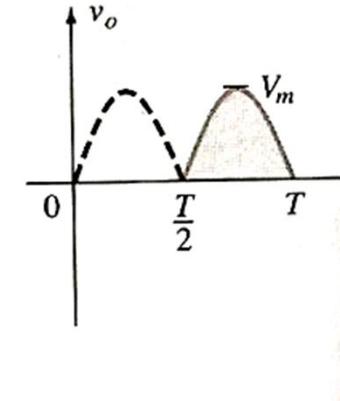
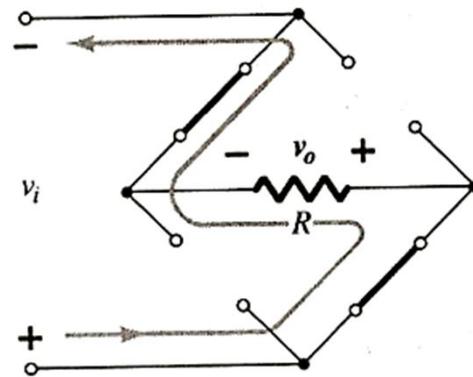
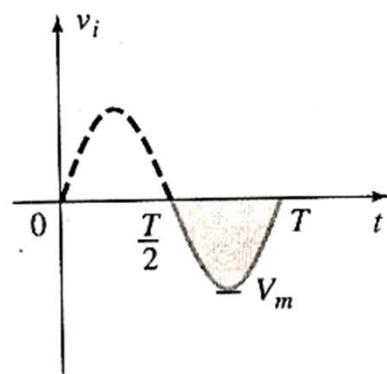
- Ciclo positivo de la entrada, los diodos 2 y 3 conducen.



Rectificador de onda completa

Puente de diodos.

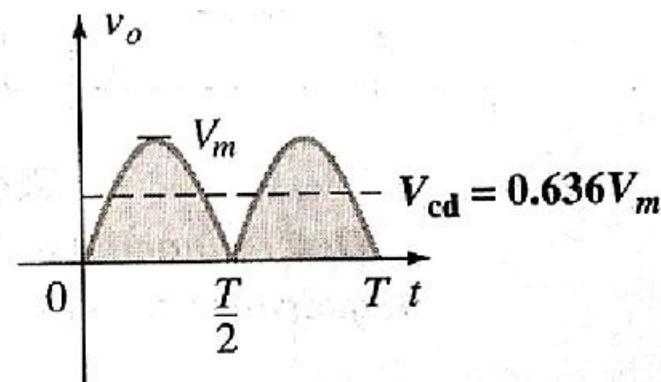
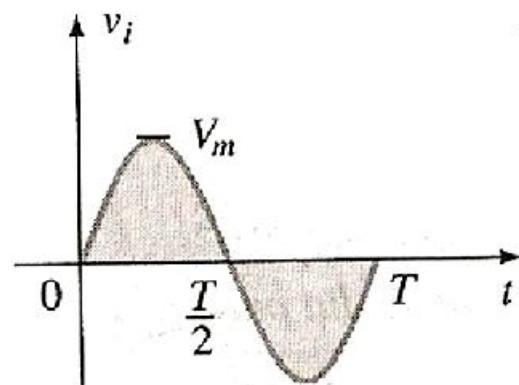
- Ciclo negativo de la entrada, los diodos 1 y 4 conducen.



Rectificador de onda completa

Puente de diodos.

- La polaridad a través de la resistencia R es la misma para cada ciclo de la señal de entrada.



Rectificador de onda completa

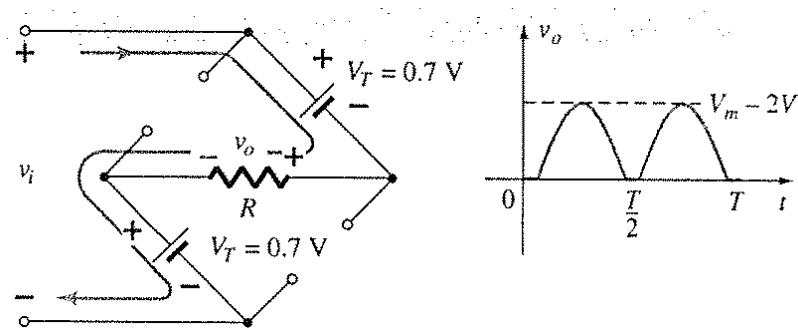
Puente de diodos.

- Si en lugar de diodos ideales se sustituye por diodos de silicio, el voltaje pico de salida quedaría como:

$$V_{o(\max)} = V_m - 2V_T$$

- El valor medio de salida podría quedar como

$$V_{o(dc)} = 0.636(V_m - 2V_T)$$



Rectificador de onda completa

Puente de diodos.

- Voltaje medio o de continua:

$$V_{o(DC)} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- Frecuencia de salida:

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

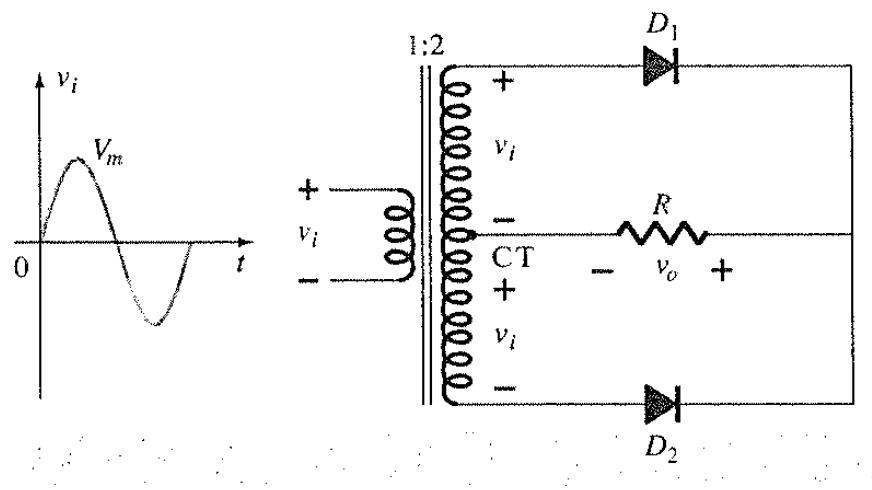
- La configuración en Puente ofrece las siguientes ventajas:

- El valor del condensador para un cierto rizado, es la mitad; con lo cual se reduce el tamaño y el precio del sistema.
 - La corriente soportada por cada diodo es aproximadamente la mitad que para el de media onda, reduciendo así el espacio ocupado por los diodos y el coste del diseño.

Rectificador de onda completa

Transformador con derivación central.

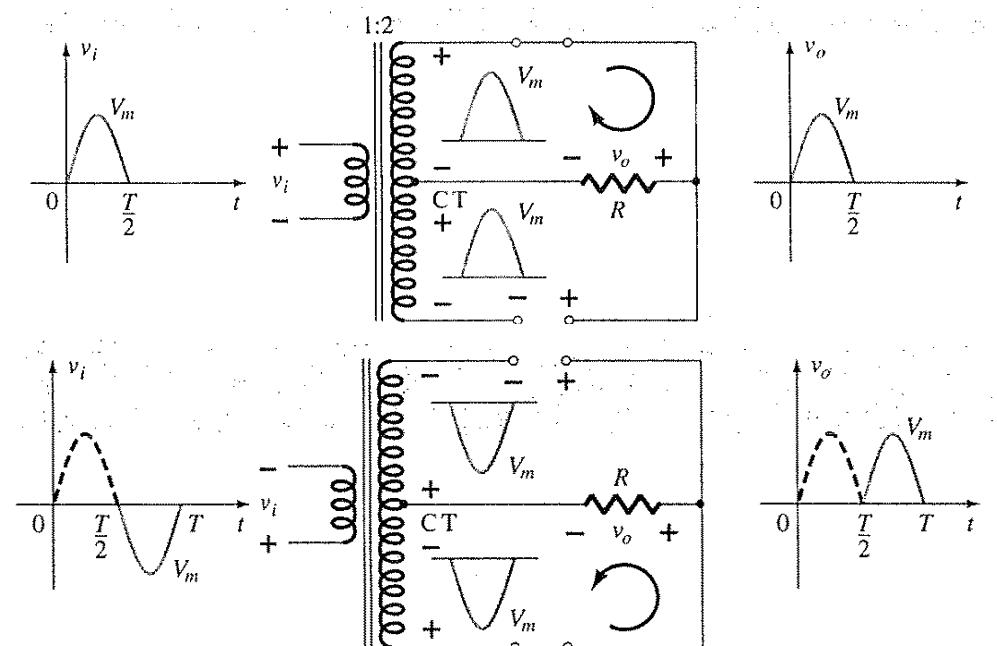
- Consiste en dos rectificadores de media onda con fuentes de tensión desfasadas 180°.
- El trafo aísla (respecto de tierra) a la carga de la corriente alterna de entrada.



Rectificador de onda completa

Transformador con derivación central.

- Durante el ciclo positivo, conduce el diodo 1; durante el ciclo negativo, el diodo 2 conduce rectificando la señal.



Rectificador de onda completa

Transformador con derivación central.

- Voltaje medio o de continua:

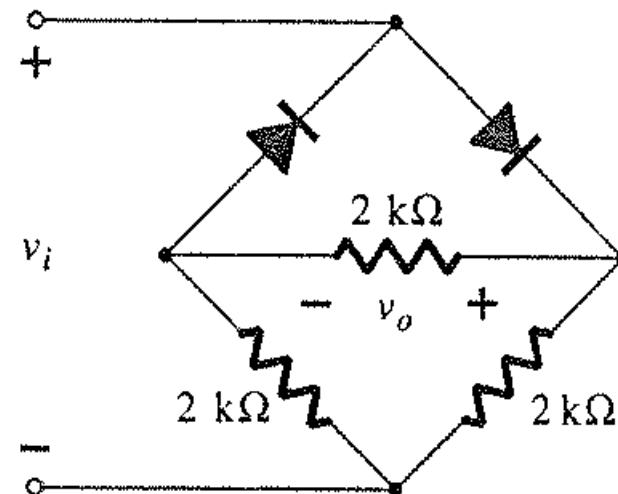
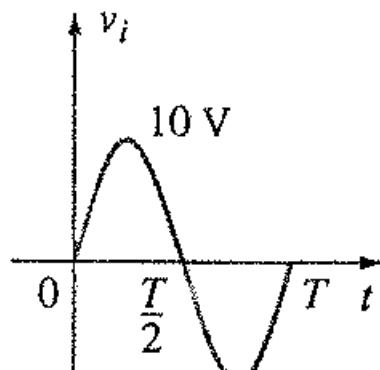
$$V_{o(DC)} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- Frecuencia de salida:

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

Rectificador de onda completa

- Determine la forma de onda de salida para la red de la figura y calcule el nivel de dc y rms de la salida, y el PIV requerido para cada diodo.





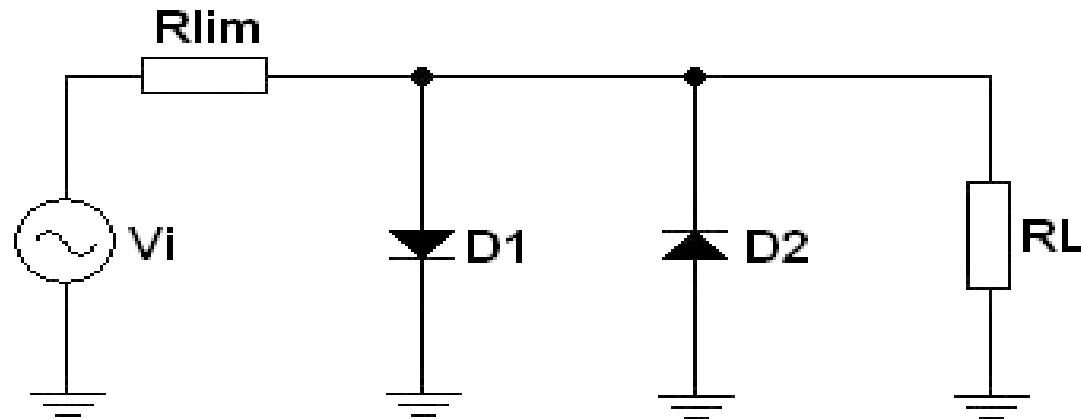
Recortadores

Recortadores

- **Circuitos Recortadores:** Son aquellos se utilizan para recortar una porción de la señal de entrada que se encuentre por encima o por debajo de algún nivel de referencia.
- También se les conoce como limitadores, selectores de amplitud o rebanadores.
- El rectificador de media onda es un ejemplo de la forma más simple de un recortador de diodo. Dependiendo de la orientación del diodo, la región positiva o negativa de la señal de entrada es “recortada”.
- Los circuitos de rectificación utilizan una acción recortadora de nivel cero.

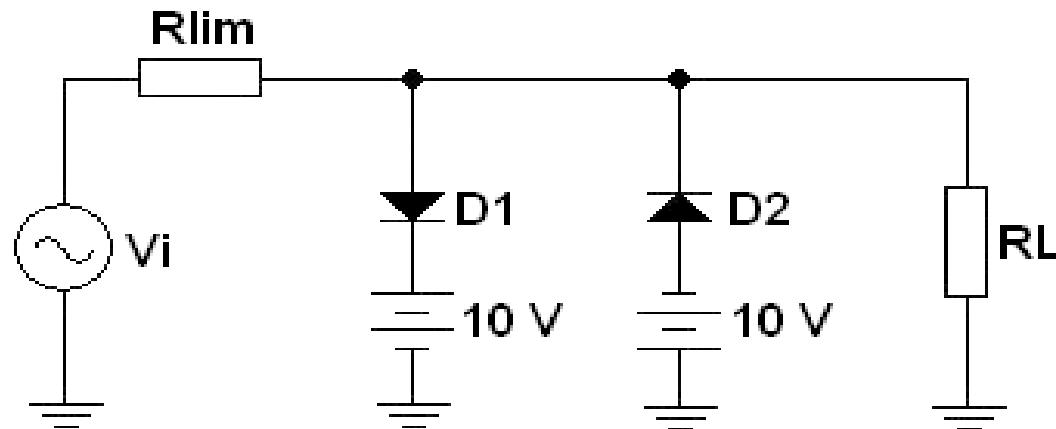
Recortadores

- Para el circuito de la figura, si la tensión de entrada supera por cualquier motivo los 0.7 V el diodo D1 quedará polarizado directamente y recortará el exceso de tensión.
- De igual forma, cuando la tensión de entrada disminuya de -0.7 V, el diodo D2 quedará polarizado directamente y recortará el exceso de tensión que podría dañar la carga.



Recortadores

- Si se añade una batería en serie con el diodo, un circuito rectificador recortará todo lo que se encuentre por encima o por debajo del valor de la batería de la orientación del diodo.
- A éste se le llama limitador o recortador polarizado.
- Para éste es necesaria una tensión de entrada igual al valor de la batería más 0.7V para que los diodos se polaricen directamente.

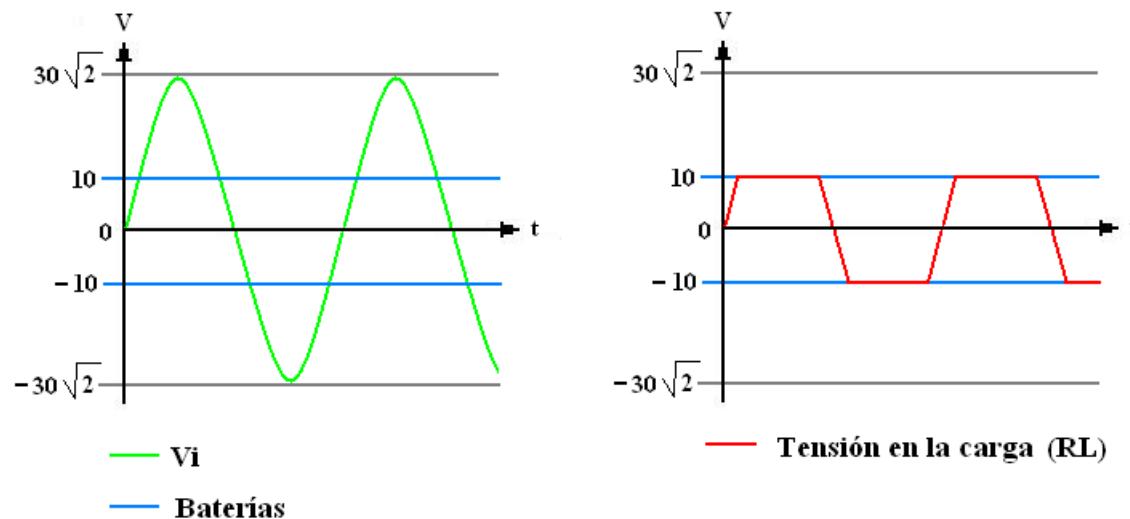


Recortadores

- Cuando la tensión de entrada se mantiene dentro de sus límites normales, esto es, entre 10 V y -10 V, ninguno de los diodos hace nada.
- La batería que está conectada al diodo D1 polariza su cátodo a 10 V, considerando el diodo ideal, comenzará a conducir cuando la tensión en su ánodo sea mayor que en su cátodo, esto ocurre sólo cuando la tensión de entrada es superior a 10 V.
- Cuando V_i supera los 10 V la tensión en el ánodo del diodo D1 comienza a ser superior que la tensión en su cátodo, con lo que el diodo D1 queda polarizado directamente y comienza a conducir la corriente eléctrica, a partir de este momento la tensión *sobrante* de la tensión de entrada V_i se ve recortada y no puede llegar a la carga.

Recortadores

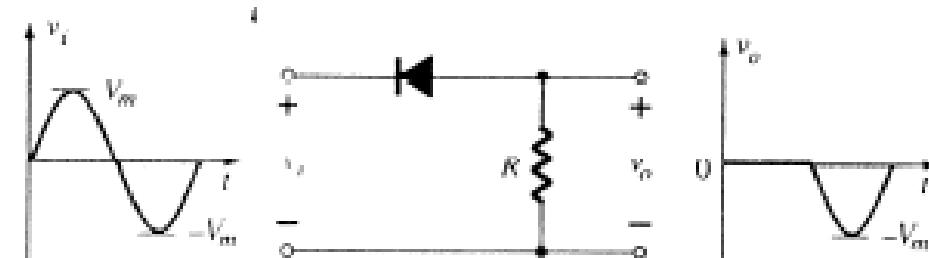
- De forma similar, la batería polariza el ánodo de D2 a -10 V. Cuando la tensión de entrada V_i es menor que -10 V, el cátodo del diodo D2 queda a un potencial menor que -10 V, con lo que el diodo se polariza directamente y recorta en este caso, las tensiones negativas de entrada, tal y como se aprecia en la gráfica.



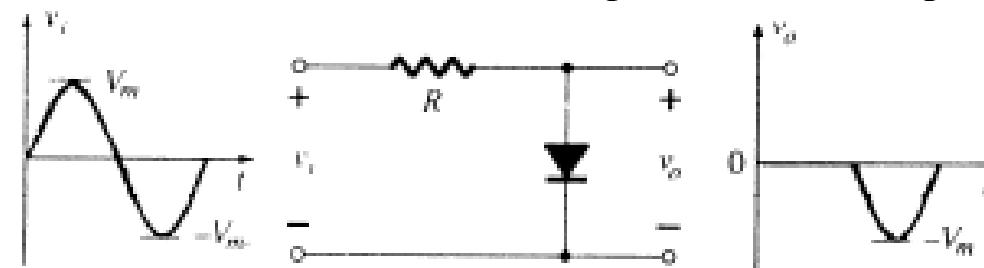
Recortadores

Tipos:

- Serie: El diodo está conectado en serie con la carga.



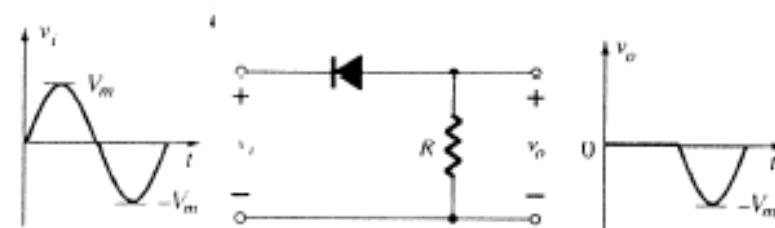
- Paralelo: El diodo está conectado en paralelo con la carga.



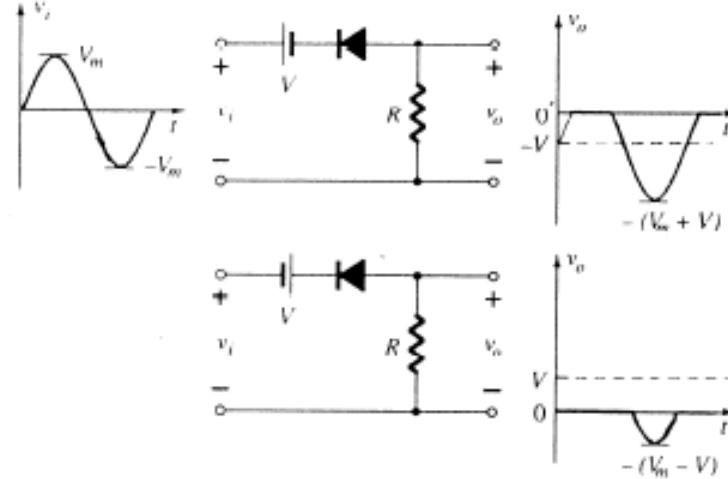
- Mixto

Recortadores en serie

Positivo simple:

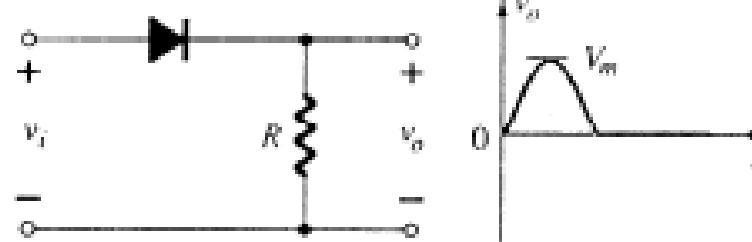


Positivos polarizados:

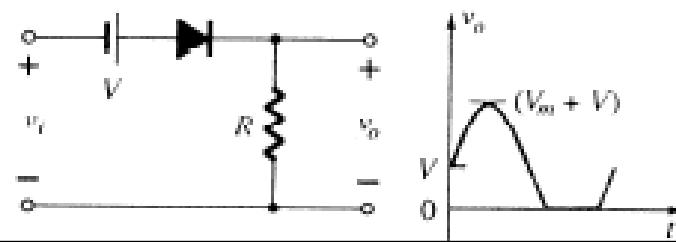
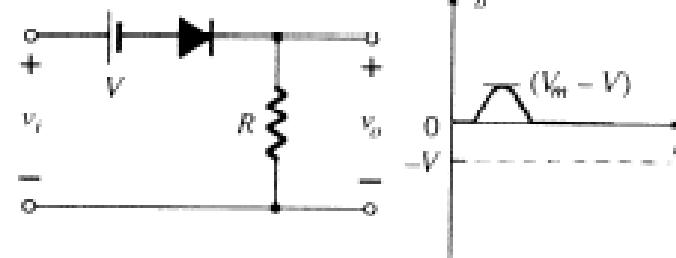


Recortadores en serie

Negativo simple:

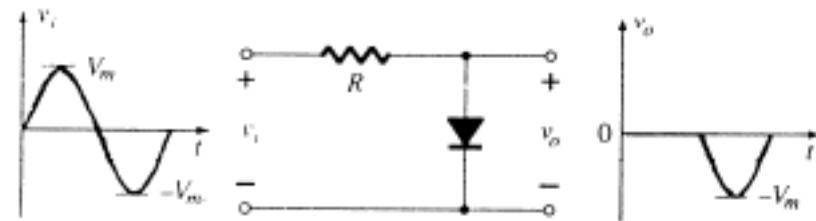


Negativos polarizados:

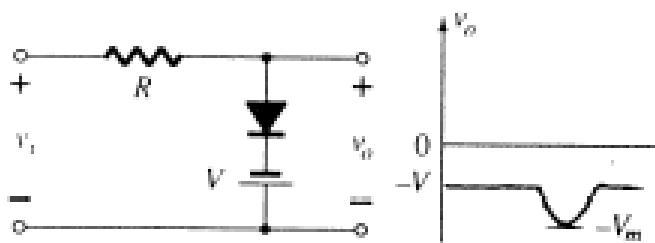
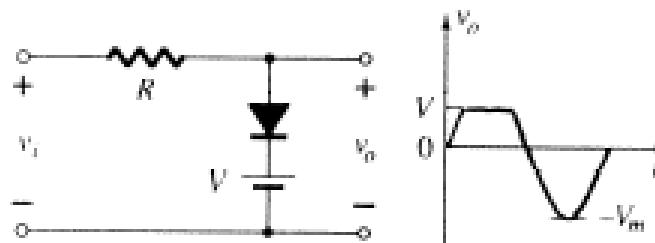


Recortadores en paralelo

Positivo simple:

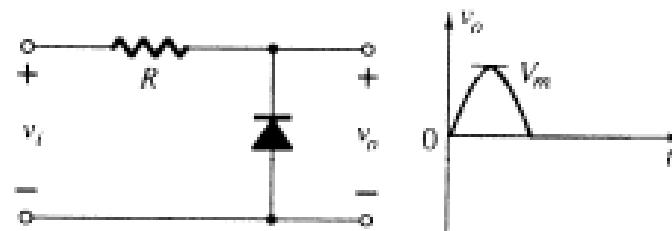


Positivos polarizados:

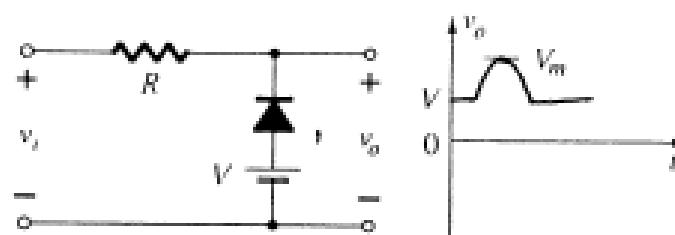
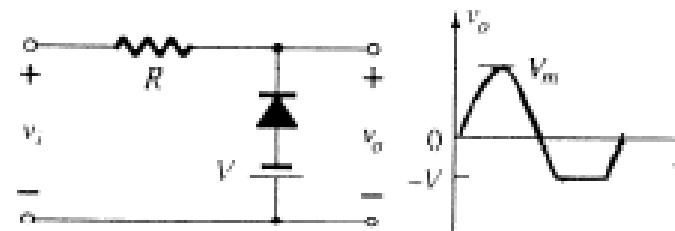


Recortadores en paralelo

Negativo simple:

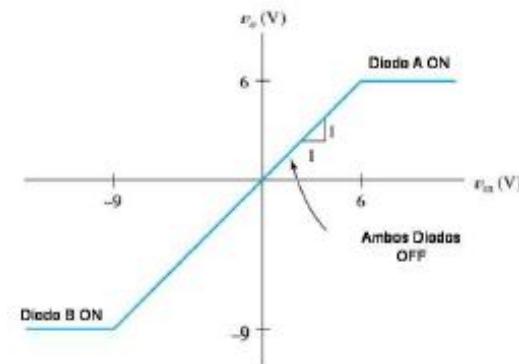
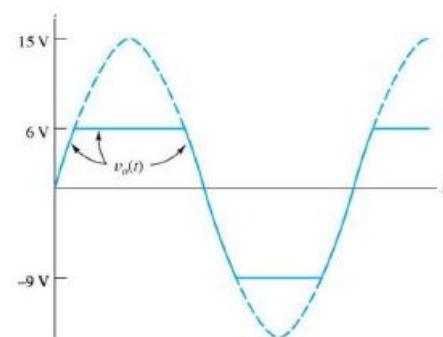
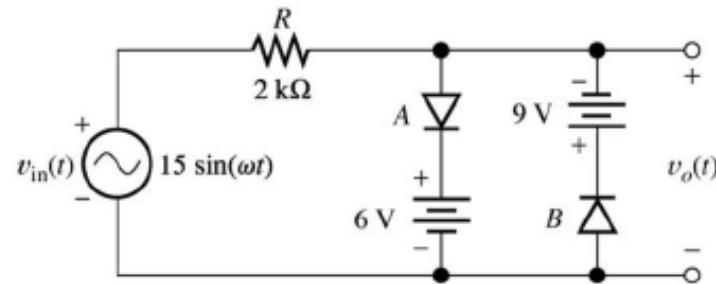


Negativos polarizados:



Recortadores en paralelo

Mixtos



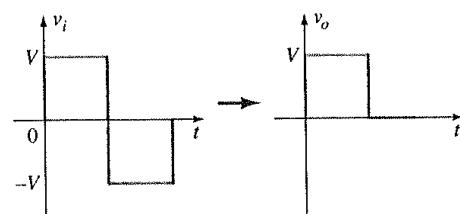
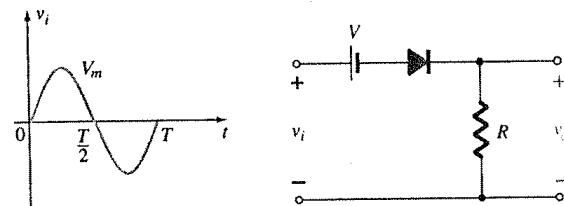
Recortadores

No existe un procedimiento general para analizar circuitos recortadores, sin embargo hay aspectos que vale la pena tomar en cuenta:

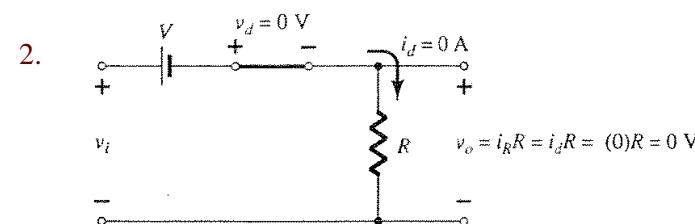
1. Hacer un esquema mental de la respuesta del circuito basado en la dirección del diodo y de los niveles aplicados de voltaje.
2. Determinar el voltaje aplicado (voltaje de transición) que causará un cambio en el estado del diodo.
3. Estar conscientes continuamente de las terminales definidas y de la polaridad de v_o .
4. Dibujar la señal de entrada por encima de la de la salida y determinar la salida para valores instantáneos de la entrada.

Recortadores

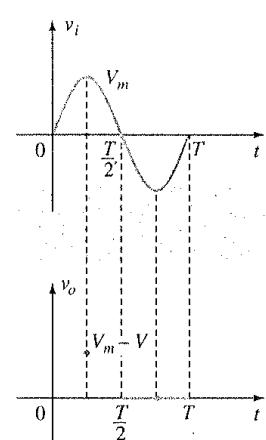
1.



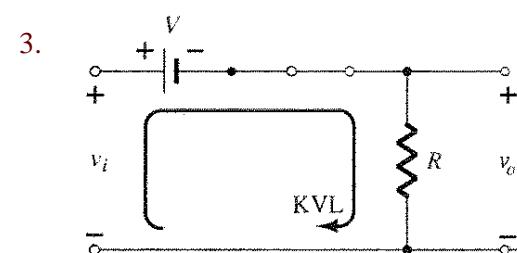
2.



4.



3.



Cambiadores de nivel

Cambiadores de nivel

- Un circuito cambiador de nivel es aquel que cambia una señal a un nivel diferente de dc.
- La red debe tener un capacitor, un diodo y un elemento resistivo. También puede emplear una fuente independiente de dc para introducir el desplazamiento.
- La magnitud de R y C debe elegirse de modo que la constante de tiempo $\tau=RC$ sea lo suficientemente grande para asegurar que el voltaje del capacitor no se descargue durante el periodo en que el diodo no conduce.

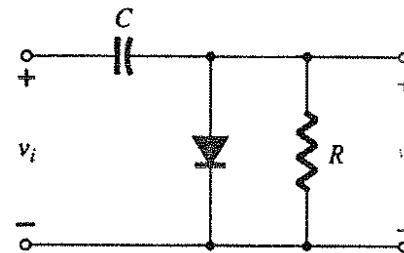
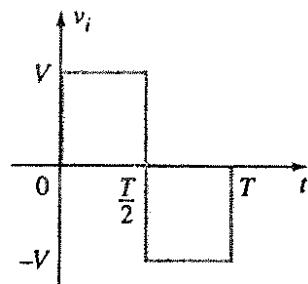
Cambiadores de nivel

Los pasos siguientes pueden ser útiles para analizar circuitos cambiadores de nivel:

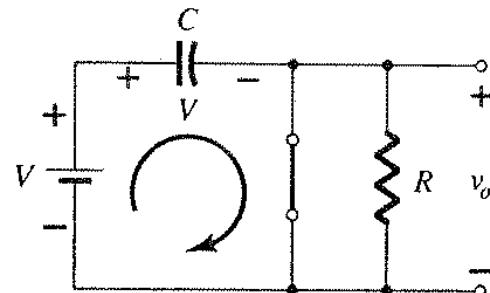
1. Comenzar el análisis considerando la parte de la señal de entrada que polarizará directamente al diodo (aunque esto implique brincarse un intervalo de la señal).
2. En el periodo en que el diodo esté encendido suponer que el capacitor se cargará instantáneamente al nivel de voltaje determinado por la red.
3. Suponer que durante el periodo de apagado del diodo el capacitor mantendrá su nivel de voltaje establecido.
4. Mantener una conciencia de la localización y la polaridad de referencia para v_o para asegurar que se obtienen los niveles apropiados de v_o .
5. Tener en mente la regla general de que la amplitud de la salida total debe coincidir con la amplitud de la señal de entrada.

Cambiadores de nivel

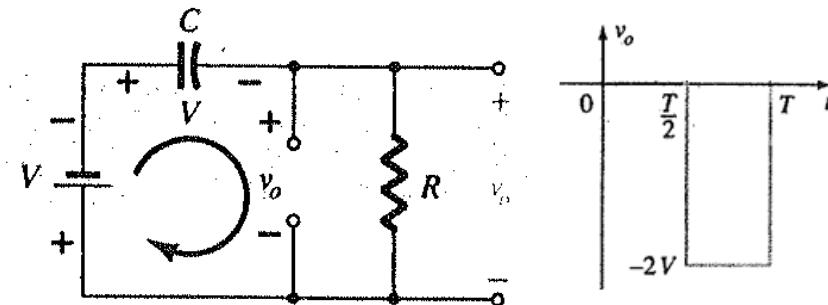
Obtener v_o .



$$0 < t < T/2 \rightarrow v_o = 0V$$

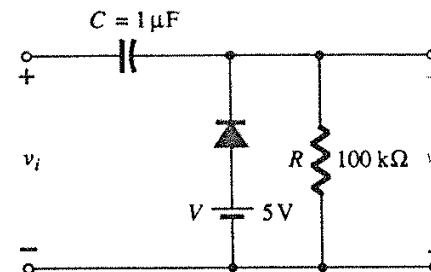
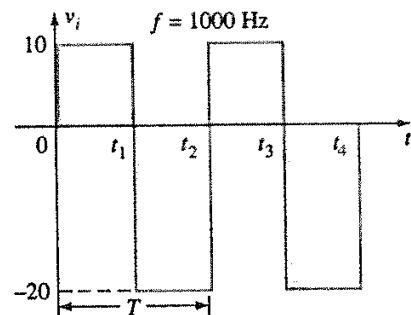


$$T/2 < t < T \rightarrow -V - V - v_o = 0$$



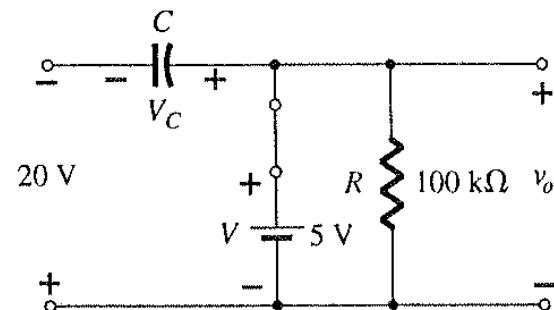
Cambiadores de nivel

Obtener v_o .



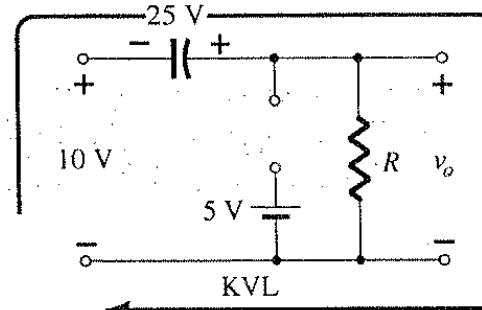
$$T/2 < t < T \rightarrow -20 \text{ V} - 5 \text{ V} + V_C = 0$$

$$V_C = 25 \text{ V} \quad v_o = 5 \text{ V}$$



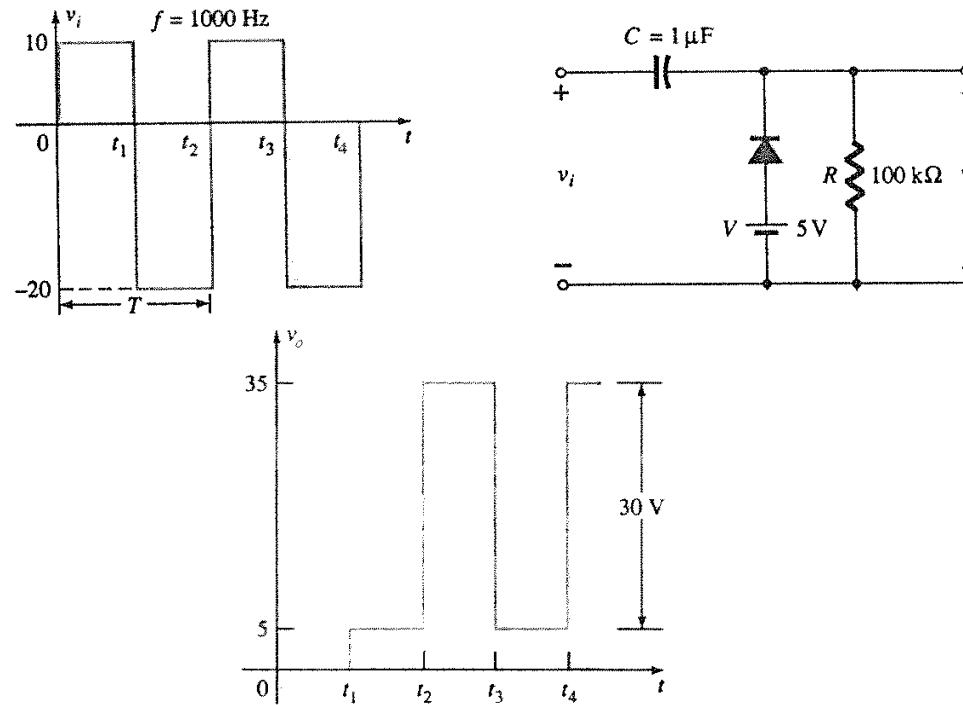
$$T < t < 3T/2 \rightarrow +10 + 25 - v_o = 0$$

$$v_o = 35 \text{ V}$$

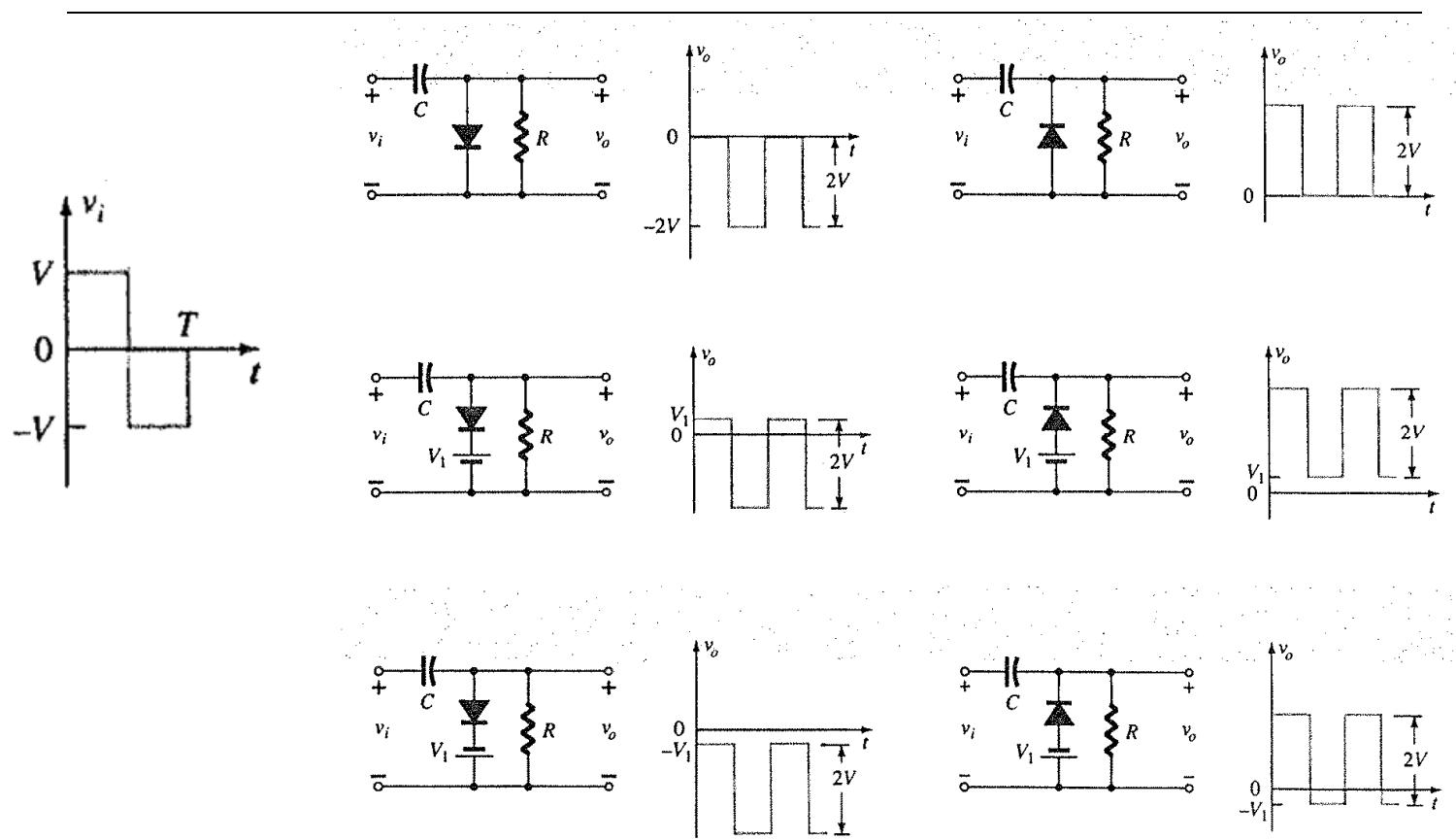


Cambiadores de nivel

$$\tau = RC = (100\text{k}\Omega)(0.1\mu\text{F}) = 0.01\text{s} = 10\text{ms}$$



Cambiadores de nivel



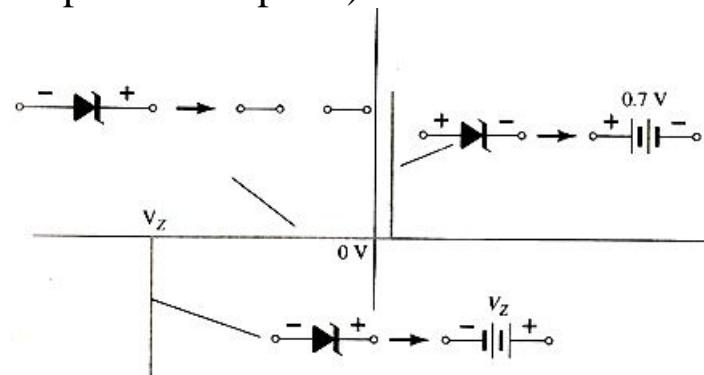
Diodo Zener

Diodos Zener

Pasos para el análisis:

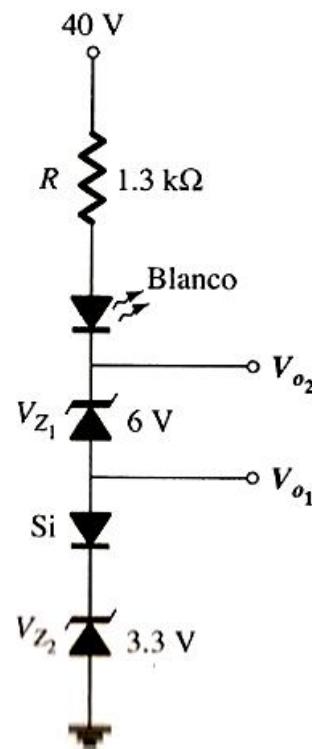
1. *Se debe determinar el estado del diodo.*
2. *Se sustituye el modelo apropiado.*
3. *Se determinan las demás cantidades desconocidas de la red.*

A continuación se presenta la gráfica de un diodo zener junto con los circuitos equivalentes aproximados para cada región (se suponen aproximaciones de línea recta en cada punto de ruptura).



Diodos Zener

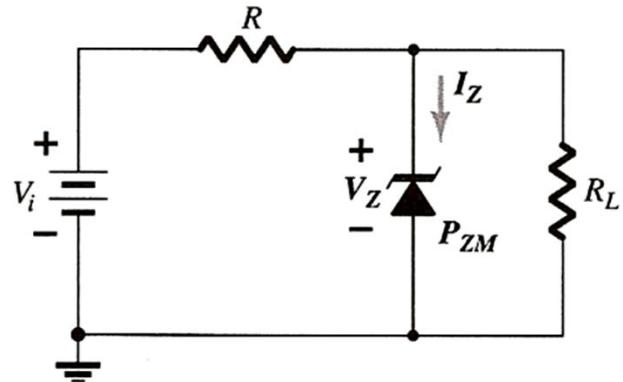
Ejemplo 1. Determinar V_{o1} , V_{o2} y la corriente alrededor de la red.



Diodos Zener (V_i y R_L fijos)

- El uso del diodo zener como regulador utilizando V_i y R fijos en la red requiere una cierta configuración básica del diodo regulador. Esta configuración se presenta a continuación:

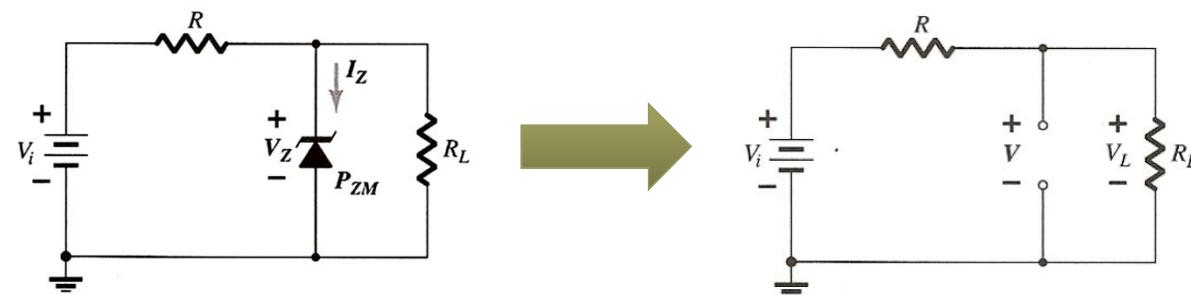
El análisis puede dividirse en dos pasos:



1. Determinar el estado del diodo Zener eliminándolo de la red y calculando el voltaje a través del circuito abierto restante.
2. Sustituir el circuito equivalente apropiado y resolver para la cantidad desconocida deseada.

Diodos Zener (V_i y R_L fijos)

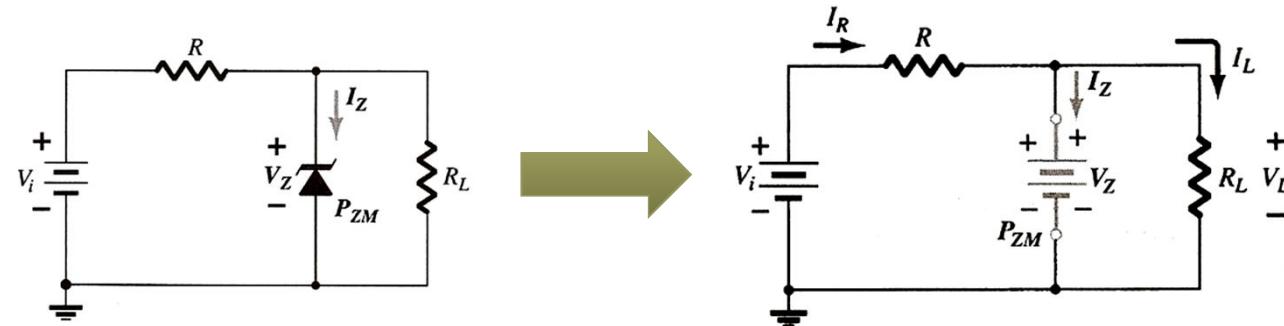
1. Determinar el estado del diodo Zener eliminándolo de la red y calculando el voltaje a través del circuito abierto restante:



- Si $V \geq V_z$ el diodo zener está encendido y se sustituye por el modelo equivalente apropiado.
- Si $V < V_z$ el diodo zener está apagado y se sustituye por su equivalente de circuito abierto.

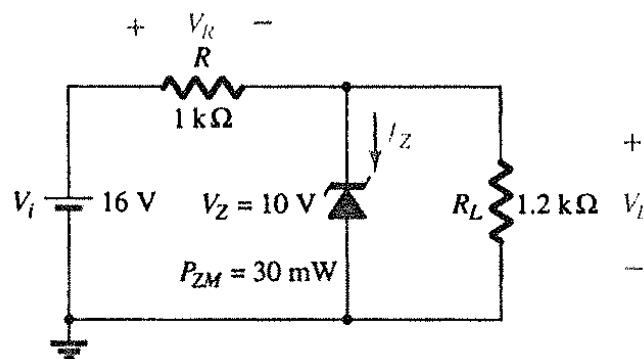
Diodos Zener (V_i y R_L fijos)

2. Sustituir el circuito equivalente apropiado y resolver para la cantidad desconocida deseada.
- Si suponemos que $V \geq V_Z$ el estado del diodo es encendido, produciendo la siguiente red equivalente:



Diodos Zener (V_i y R_L fijos)

- Ejemplo 2a. Determinar V_L , V_R , I_Z , P_Z .



- Ejemplo 2b. Determinar V_L , V_R , I_Z con $R_L = 3\text{K}\Omega$.

Diodos Zener (V_i fija y R_L variable)

- Para determinar la resistencia mínima de carga que encenderá el diodo zener simplemente se calcula el valor de R_L que ocasionará un voltaje de carga $V_L = V_Z$:

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

- Resolviendo para R_L queda:

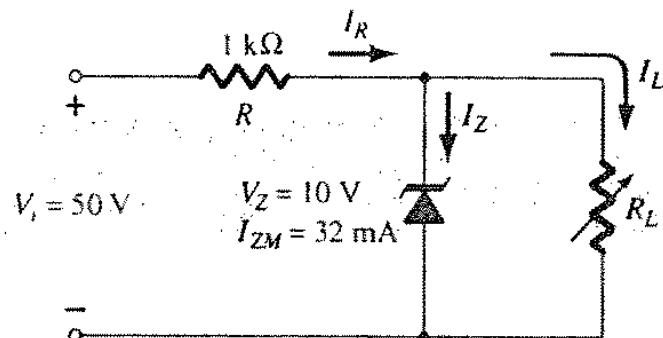
$$R_L = \frac{(R)V_Z}{V_i - V_Z}$$

- Cualquier resistencia de carga mayor que R_L obtenida con la ecuación anterior asegurará que el diodo zener se encuentre encendido.
- La corriente del diodo está limitada a I_{ZM} , esto afectará la resistencia máxima R_L .
- La corriente I_L mínima se obtiene a partir de la corriente del diodo $I_Z = I_R - I_L$

$$I_{L\min} = I_R - I_{ZM} \quad R_{L\max} = \frac{V_Z}{I_{L\min}}$$

Diodos Zener (V_i fija y R_L variable)

- Determinar el rango de R_L e I_L que hacen que V_{RL} se mantenga en 10V.
Determinar el valor nominal máximo de la potencia en watts del diodo.



Diodos Zener (R_L fija y V_i variable)

- El voltaje de encendido mínimo que se requiere para que el diodo zener genere voltaje es:

$$V_{i\min} = \frac{(R + R_L)V_Z}{R_L}$$

- Ahora, para hallar el voltaje máximo de V_i , se debe tomar en cuenta la corriente máxima que soporta el diodo zener, y como $I_Z = I_R - I_L$,

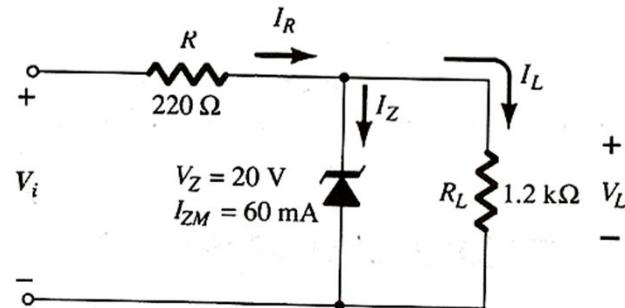
$$I_{R\max} = I_Z + I_L$$

- Finalmente como I_L se mantiene fija e I_Z es el valor máximo de corriente que soporta el diodo zener, el V_i máximo se define como:

$$V_{i\max} = I_{R\max}R + V_Z$$

Diodos Zener (R_L fija y V_i variable)

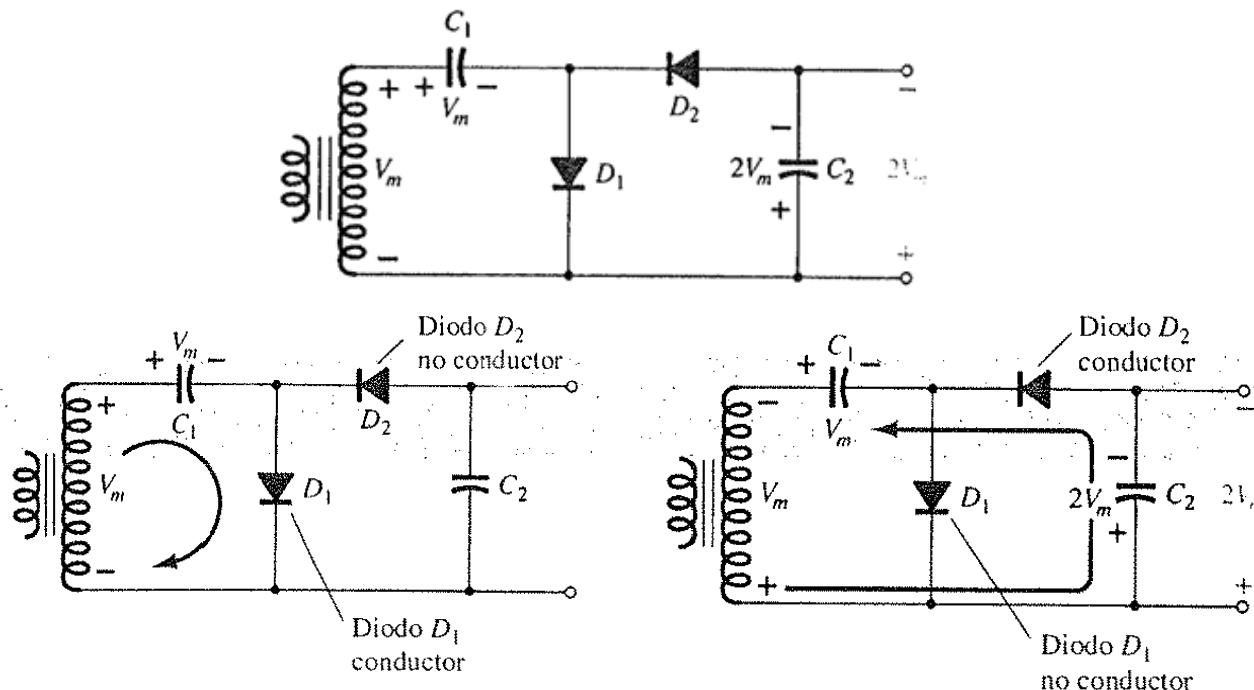
- Ejemplo 3. Determinar el rango de valores de V_i que mantendrán encendido el diodo zener utilizando el siguiente circuito:



Multiplicadores de Voltaje

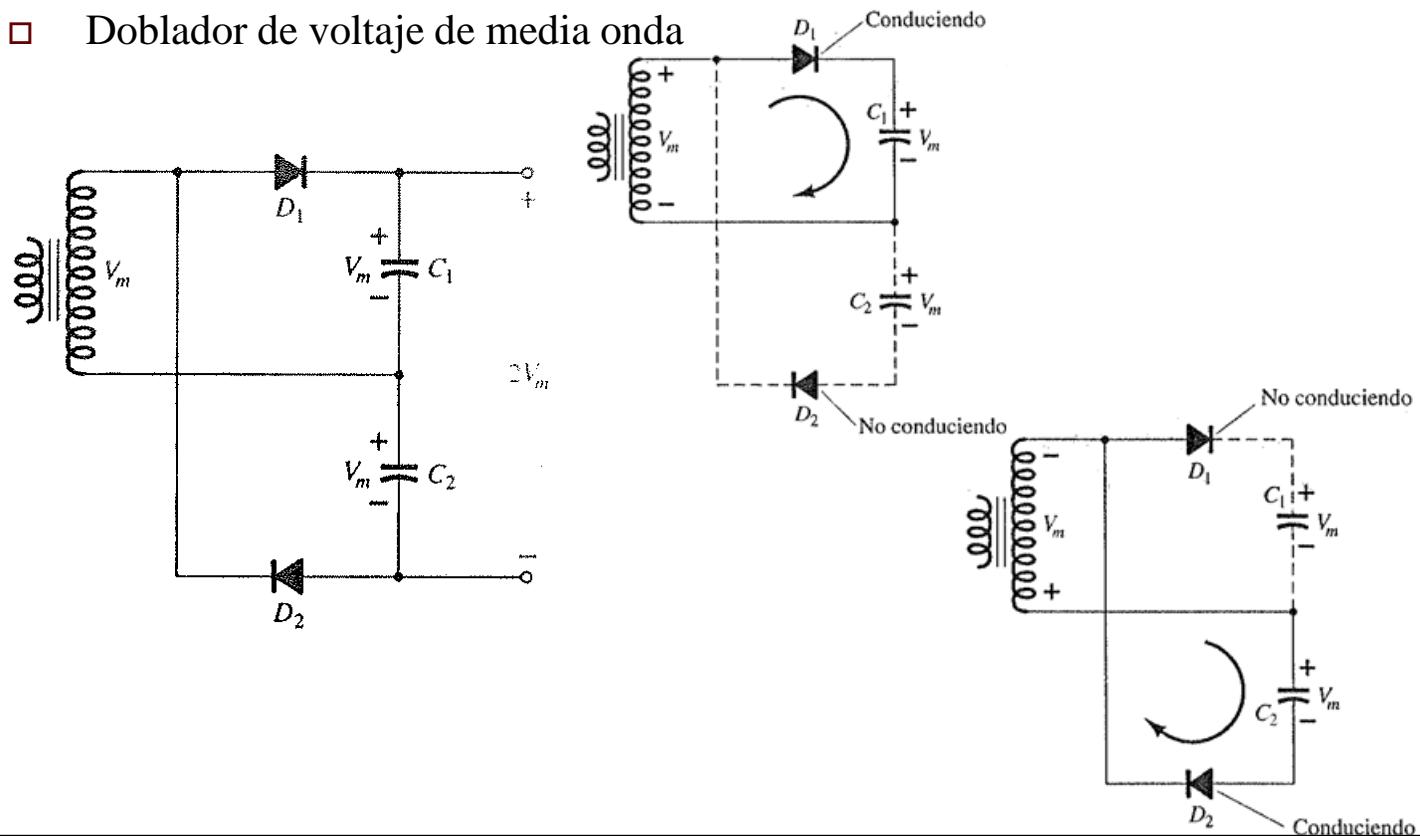
Multiplicadores de voltaje

- Doblador de voltaje de media onda



Multiplicadores de voltaje

- Doblador de voltaje de media onda



Multiplicadores de voltaje

- Triplicador y cuatriplicador de voltaje

