

TEMA 4
DIODOS Y APLICACIONES
(Guía de Clases)

Asignatura: Dispositivos Electrónicos I
Dpto. Tecnología Electrónica

CONTENIDO

UNIÓN P-N EN CIRCUITO ABIERTO

UNIÓN P-N POLARIZADA

En sentido inverso

En sentido directo

CARACTERÍSTICAS TENSIÓN-CORRIENTE

RESISTENCIA ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DIODO

MODELOS DEL DIODO

Diodo ideal

Diodo real

CAPACIDAD DE LA ZONA DE CARGA ESPACIAL O TRANSICIÓN

Diodos de capacidad variable (Varicaps)

CAPACIDAD DE DIFUSIÓN

TIEMPOS DE CONMUTACIÓN DEL DIODO

DIODOS DE AVALANCHA O ZENERS

DIODOS DE REFERENCIA DE TENSIÓN

FOTODIODOS SEMICONDUCTORES

DIODOS EMISORES DE LUZ (LED)

CIRCUITO BÁSICO. CONCEPTO DE RECTA DE CARGA

CIRCUITOS RECORTADORES

CIRCUITOS FIJADORES O LIMITADORES

CIRCUITOS RECTIFICADORES

Rectificador de media onda

Rectificador de onda completa

Rectificador en puente

DOBLADOR DE TENSIÓN

FILTRADO CON CONDENSADORES

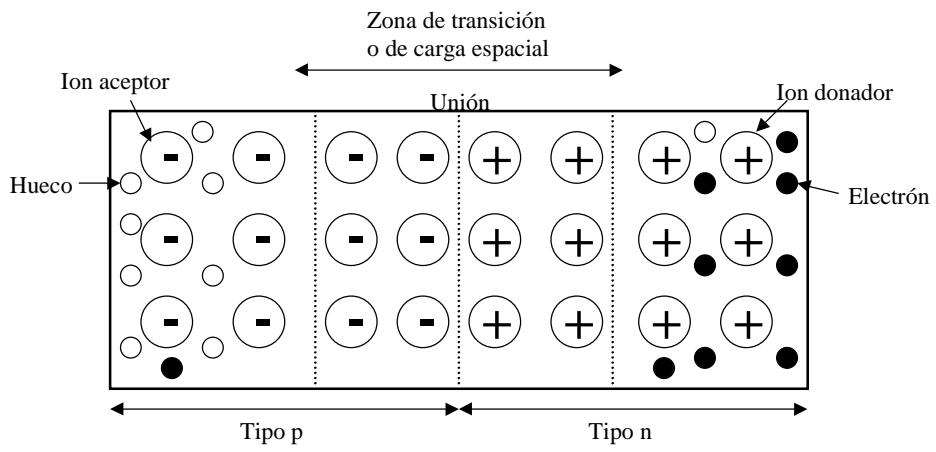
Filtrado. Explicación cualitativa

Aproximaciones al filtrado

Ejemplo de cálculo

Detector de picos o demoduladora de AM

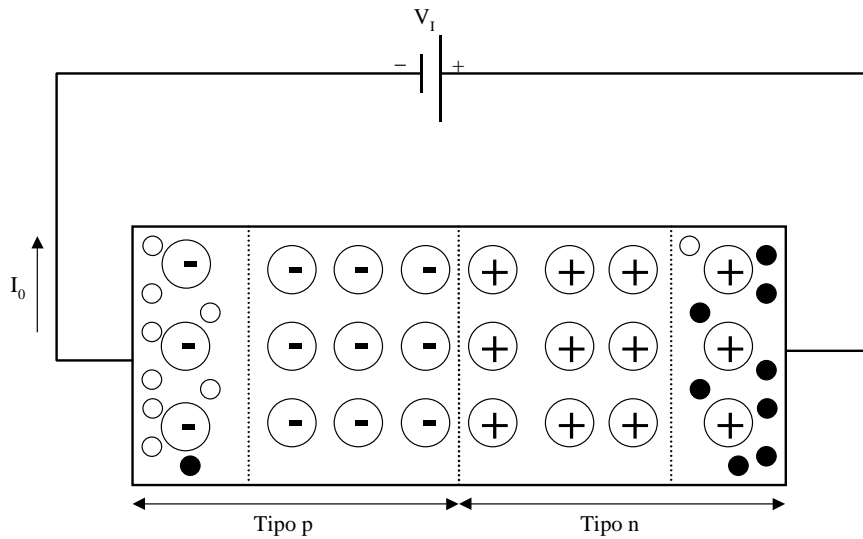
UNIÓN P-N EN CIRCUITO ABIERTO



ANOTACIONES

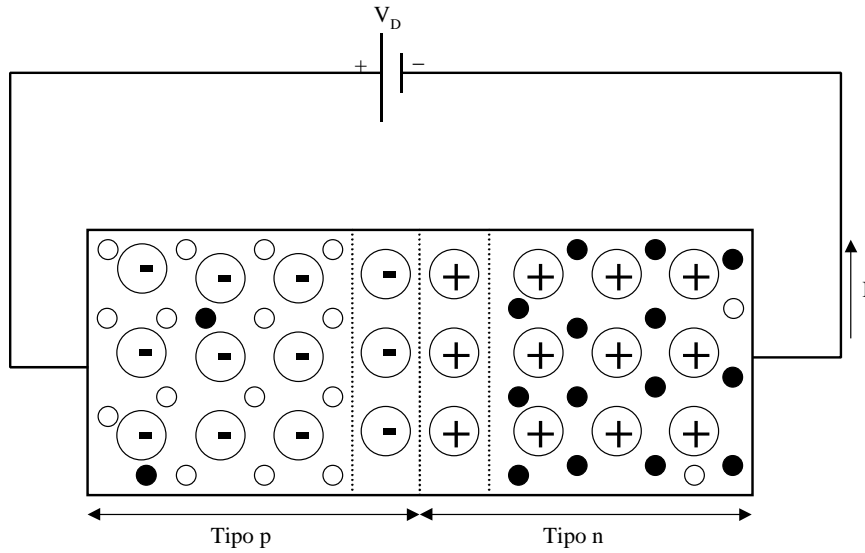
UNIÓN P-N POLARIZADA**a) En sentido inverso**

Aumenta la zona de carga espacial. V pasa a ser $V_o + V_I$. Se produce una corriente inversa debido a los portadores minoritarios y a los pares electrón-hueco creados en la zona de carga espacial. Esta corriente se denomina corriente inversa de saturación (I_o).

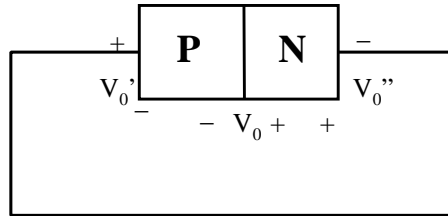


b) En sentido directo

Disminuye la zona de carga espacial. V pasa a ser $V_o - V_D$. Si $V_D \geq V_o$ entonces se produce una corriente debida a los huecos que son “empujados” por el terminal positivo de V_D hacia la zona N, y a los electrones que son “empujados” por el terminal negativo de V_D hacia la zona P.



En cortocircuito el potencial de contacto se compensa con los potenciales en los contactos óhmicos de los terminales => $I=0$.

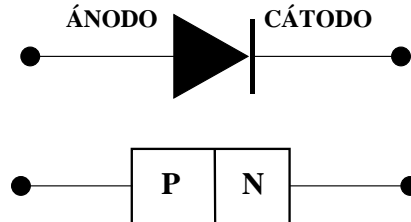


$$V_0 - V_0' - V_0'' = 0$$

$$I = 0$$

Grandes tensiones directas -> necesidad de limitar la corriente

Símbolo del diodo:



CARACTERÍSTICA TENSIÓN-CORRIENTE

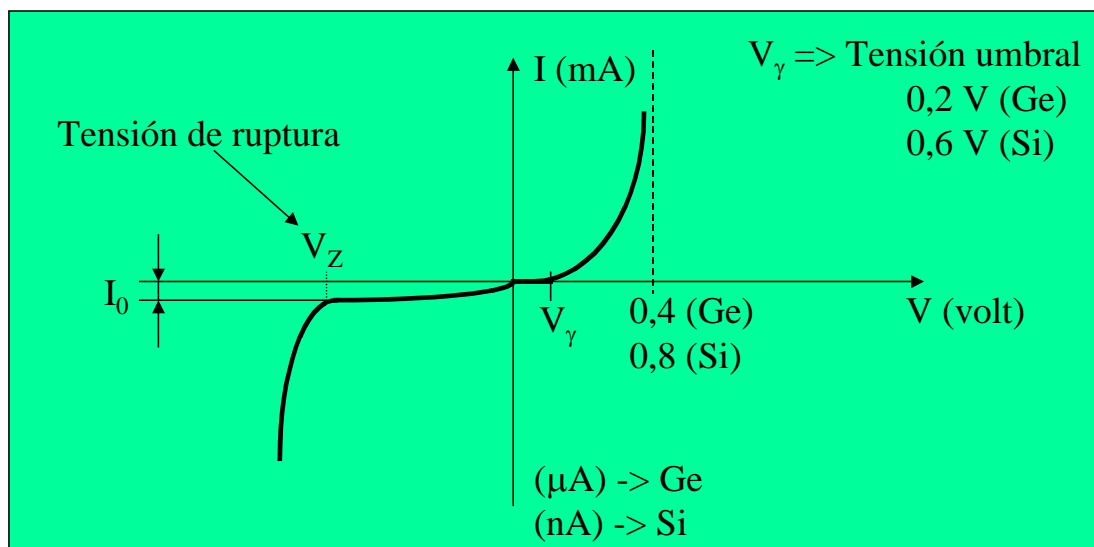
Ecuación característica del diodo: $I = I_0(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$ se deduce de la ley de la unión

I_0 : corriente inversa de saturación (constante a T constante)

η : constante. Su valor es aproximadamente 1 para el Germanio. En el caso del Silicio su valor es 2 para corrientes pequeñas y 1 para corrientes moderadas o grandes.

V_T : Tensión equivalente de la temperatura $V_T = T/11.600$

a temperatura ambiente ($T=300$ °K) $V_T = 0'026$ V



Tensión umbral (V_γ): tensión directa mínima para que se inicie la conducción.

La corriente inversa I_0 aumenta con la temperatura aproximadamente un 7% por °C para el Si. La corriente inversa de saturación se duplica aproximadamente por cada 10 °C de aumento de temperatura. Si $I_0 = I_{01}$ cuando $T = T_1$, cuando la temperatura es T I_0 viene dado por:

$$I_0(T) = I_{01} * 2^{(T-T_1)/10}$$

La Tensión equivalente de la temperatura V_T también aumenta con la temperatura.

Para mantener constante I con $T \Rightarrow dV/dT \approx -2'5$ mv/°C.

ANOTACIONES

RESISTENCIA ESTÁTICA Y DINÁMICA DE UN DIODO

Resistencia estática (R): $R = V/I$ -> parámetro muy variable y poco útil

Resistencia dinámica (r): $r = dV/dI$

$$I = I_0(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1)$$

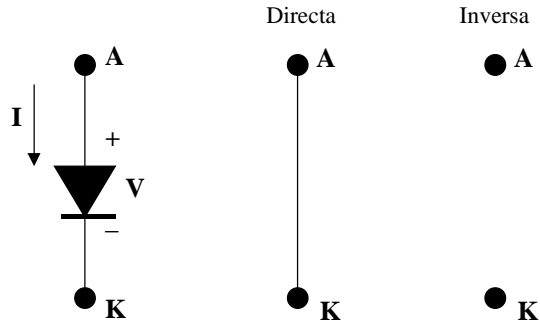
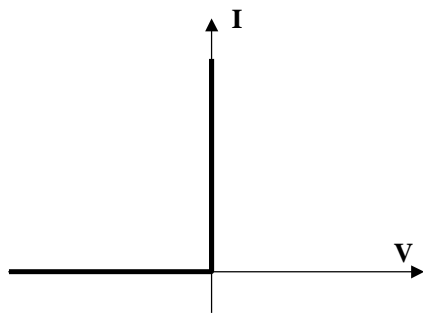
$$g = \frac{1}{r} = \frac{dI}{dV} = \frac{I_0 e^{\frac{V}{\eta V_T}}}{\eta V_T} = \frac{I_0 + I}{\eta V_T} \approx \frac{I}{\eta V_T}$$

$$r \approx \frac{\eta V_T}{I} = \frac{K}{I} \quad \text{K es constante a temperatura constante.}$$

Para modelos de pequeña señal se puede suponer r constante

MODELOS DEL DIODO

a) Diodo ideal

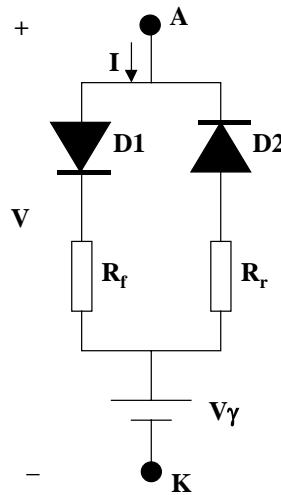
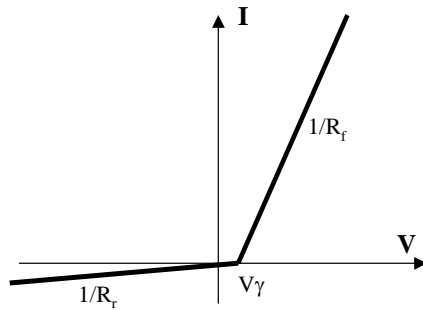


$$V_\gamma = 0$$

$$V \geq V_\gamma \rightarrow R_f = 0$$

$$V < V_\gamma \rightarrow R_r = \infty$$

b) Diodo real



D1 y D2 son ideales

$$V \geq V_\gamma \rightarrow V = V_\gamma + I R_f$$

$$V < V_\gamma \rightarrow V = V_\gamma + I R_r$$

Modelos intermedios: $R_f = 0$ ó $R_r = \infty$ ó $V_\gamma = 0$ ó combinaciones.

ANOTACIONES

CAPACIDAD DE LA ZONA DE CARGA ESPACIAL O TRANSICIÓN

La anchura de la zona de carga espacial y por lo tanto la carga aumenta con la tensión inversa, lo cual equivale a un efecto de capacidad:

$$C_T = \left| \frac{dQ}{dV_I} \right| \quad \text{donde } C_T \text{ es la capacidad de transición}$$

Supongamos unión abrupta con $N_A \gg N_D$ y polarizada inversamente con V_I :

$$q \cdot N_A \cdot W_p \cdot A = q \cdot N_D \cdot W_n \cdot A \Rightarrow N_A \cdot W_p = N_D \cdot W_n$$

$$\text{Si } N_A \gg N_D \Rightarrow W_p \ll W_n \approx W$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} \Rightarrow E = \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} x + K$$

$$E(x=W) = 0 \Rightarrow K = -\frac{q \cdot N_D}{\epsilon} W$$

$$\Rightarrow E = \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} (x - W)$$

$$-\frac{dV}{dx} = \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} (x - W) \Rightarrow V = -\frac{q \cdot N_D}{\epsilon} \left(\frac{x^2}{2} - Wx \right) + K'$$

$$V(x=0) = 0 \Rightarrow K' = 0 \Rightarrow V = -\frac{q \cdot N_D}{2\epsilon} (x^2 - 2Wx)$$

$$x=W \rightarrow V_j = V_0 + V_I = \frac{q \cdot N_D \cdot W^2}{2\epsilon} \Rightarrow W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q \cdot N_D} V_j}$$

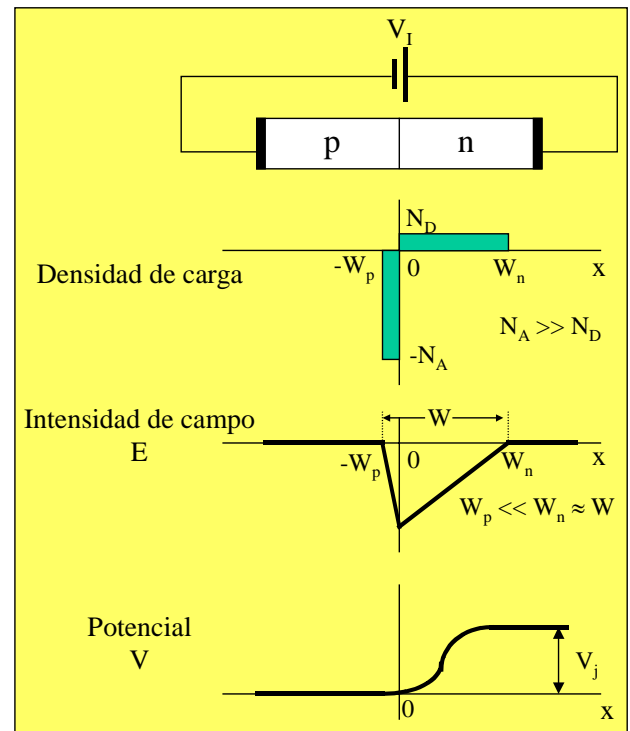
W aumenta con la V_I aplicada

$$W^2 = \frac{2\epsilon}{q \cdot N_D} V_j \Rightarrow 2W \frac{dW}{dV_j} = \frac{2\epsilon}{q \cdot N_D} \Rightarrow \frac{dW}{dV_j} = \frac{\epsilon}{q \cdot N_D \cdot W}$$

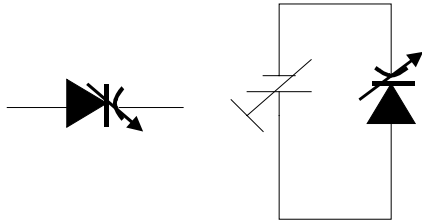
$$Q = q \cdot N_D \cdot W \cdot A \Rightarrow dQ = q \cdot N_D \cdot A \cdot dW$$

$$C_T = \left| \frac{dQ}{dV_j} \right| = q \cdot N_D \cdot A \cdot \left| \frac{dW}{dV_j} \right| = \epsilon \frac{A}{W}$$

Capacidad de condensador plano con placas de superficie A y distancia entre ellas de W. Resultado también válido para unión gradual.



ANOTACIONES

Diodos de capacidad variable (Varicaps: **Variable capacitors**):

$$C_T = \epsilon \frac{A}{W} = \frac{\epsilon \cdot A}{\sqrt{\frac{2\epsilon}{q \cdot N_D}} \cdot \sqrt{V_j}} = \frac{cte}{\sqrt{V_j}} \Rightarrow \text{Si } V_j \text{ aumenta entonces } C_T \text{ disminuye (rango de pF)}$$

Aplicación de los varicaps: Filtros variables, sintonizadores LC de radiofrecuencia (VHF, UHF)

CAPACIDAD DE DIFUSIÓN

En polarización directa si V_D aumenta implica que aumenta la concentración de minoritarios en ambos lados, y entonces aumenta la carga almacenada Q produciéndose también en este caso un efecto capacitivo:

$$I = \frac{Q}{\tau} \equiv \text{Modelo de control de la carga de un diodo}$$

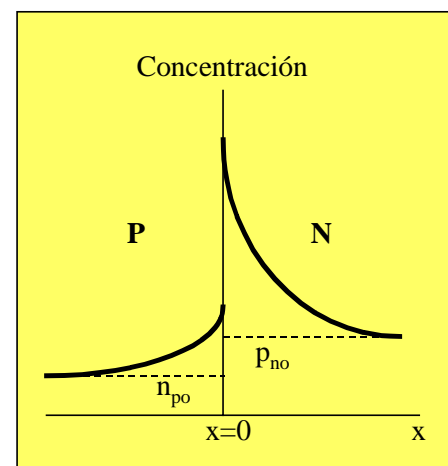
$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau \cdot dI}{dV} = \frac{\tau}{r}$$

τ : tiempo de vida medio de los portadores

r : resistencia dinámica de la unión

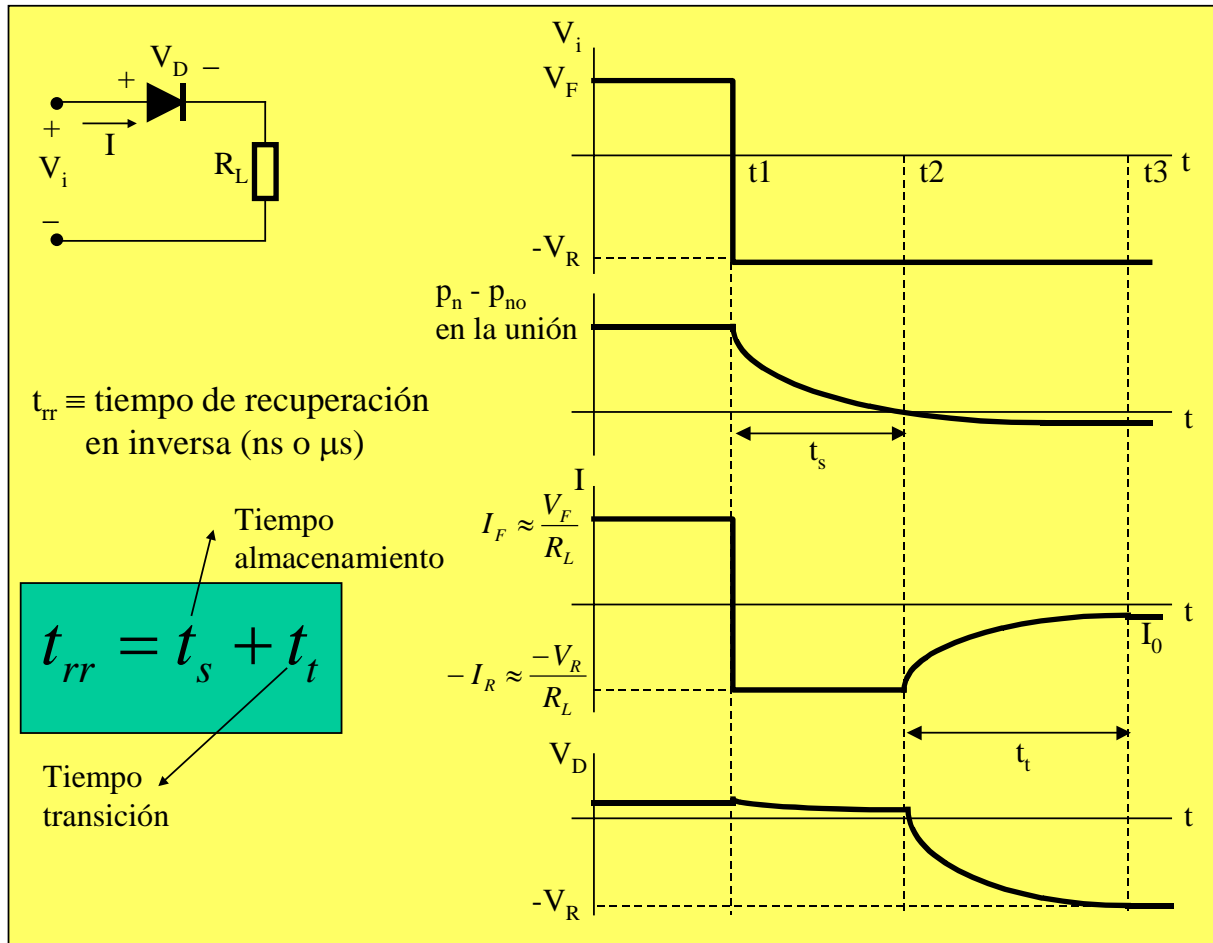
$$C_D = C_{Dp} + C_{Dn} = \frac{\tau_p}{r} + \frac{\tau_n}{r}$$

C_D (orden de μF) es mucho mayor que C_T (puede llegar a nF)

**ANOTACIONES**

TIEMPOS DE CONMUTACIÓN DEL DIODO

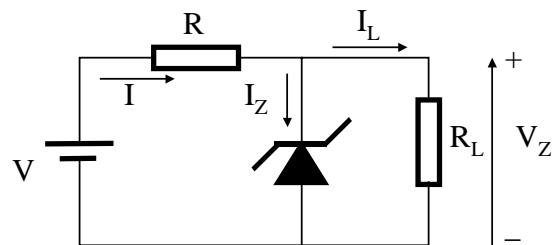
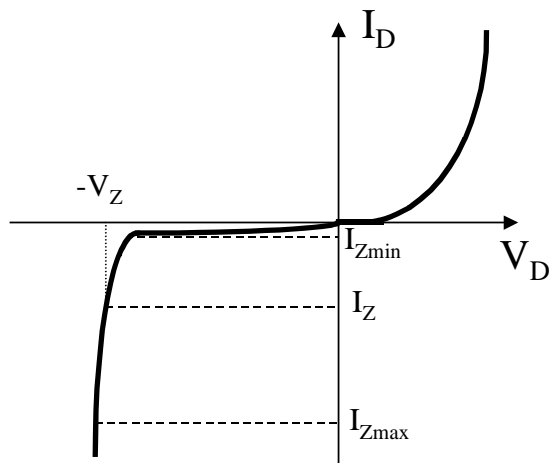
$C_D \gg C_T \Rightarrow$ Es mucho más importante el tiempo de recuperación al pasar de conducción directa a inversa que al revés.



ANOTACIONES

DIODOS DE AVALANCHA O ZENERS

Son diodos con suficiente capacidad de disipación para trabajar en la zona de conducción inversa. Se utilizan como estabilizadores de tensión.



$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} R_L \uparrow \Rightarrow I_Z \uparrow \\ R_L \downarrow \Rightarrow I_Z \downarrow \end{array} \right\} \Rightarrow V_Z \approx \text{constante}$$

$$\text{Si } \left\{ \begin{array}{l} V \uparrow \Rightarrow I_Z \uparrow \\ V \downarrow \Rightarrow I_Z \downarrow \end{array} \right\} \Rightarrow V_Z \approx \text{constante}$$

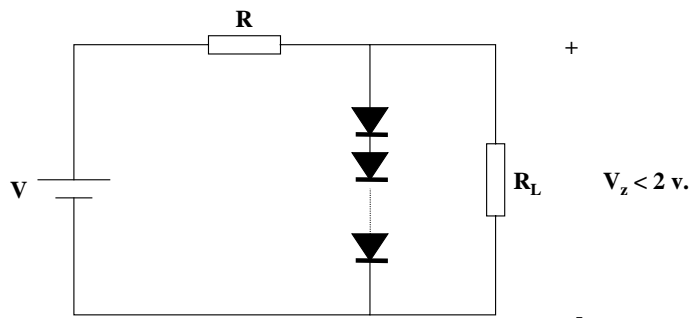
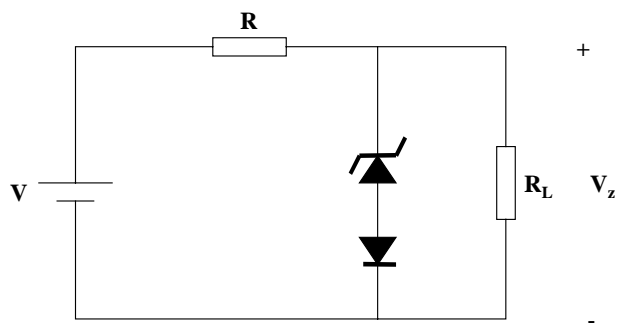
Hay dos mecanismos para que se produzca la avalancha del diodo: Multiplicación por avalancha y Ruptura Zener.

Multiplicación por avalancha (creación por choque):

Este mecanismo es el utilizado en diodos poco impurificados y que tienen una tensión Zener V_z mayor a 6 voltios. La zona de carga espacial es ancha. Tienen un coeficiente de temperatura positivo, es decir, con el aumento de la temperatura aumenta la tensión Zener

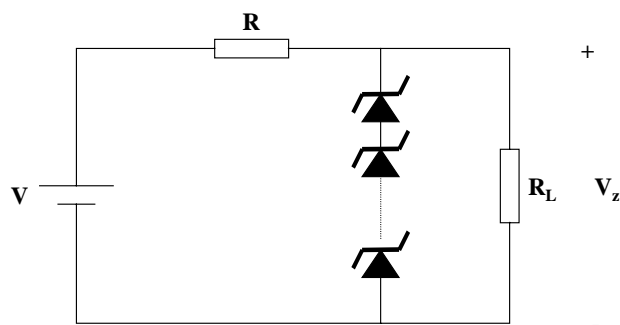
Ruptura Zener:

Este mecanismo es el que se produce en diodos muy impurificados y que tienen una tensión Zener V_z menor a 6 voltios. La zona de carga espacial es estrecha. Tienen un coeficiente de temperatura negativo, es decir, con el aumento de la temperatura disminuye la tensión Zener.

DIODOS DE REFERENCIA DE TENSIÓNa) Tensiones de referencia inferiores a 2 V.b) Pequeño coeficiente de temperatura

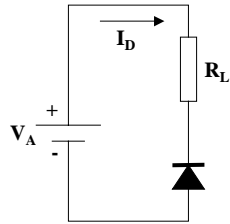
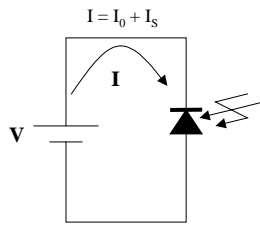
Zener (multiplicación por avalancha): coeficiente de temperatura positivo

Diodo (en directa): coeficiente de temperatura negativo

c) Tensiones de referencia altas

- Menor disipación que con un único zener de V_z elevada
- Menor coeficiente de temperatura combinando los dos tipos de zener
- Menor resistencia que con diodos en directa

ANOTACIONES

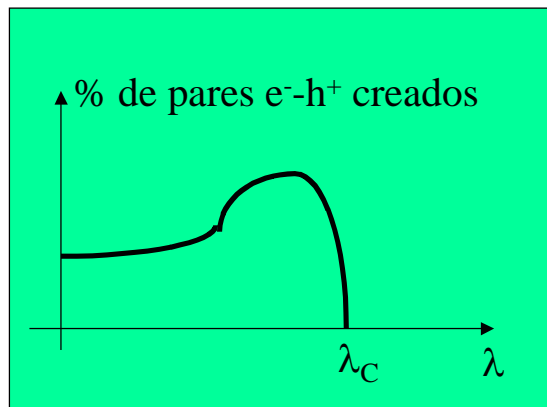
FOTODIODOS SEMICONDUCTORES

$$V_D = V_A - I_D R_L \rightarrow \text{recta de carga}$$

$$\text{Si } I_D = 0 \Rightarrow V_D = V_A$$

$$\text{Si } V_D = 0 \Rightarrow I_D = V_A/R_L$$

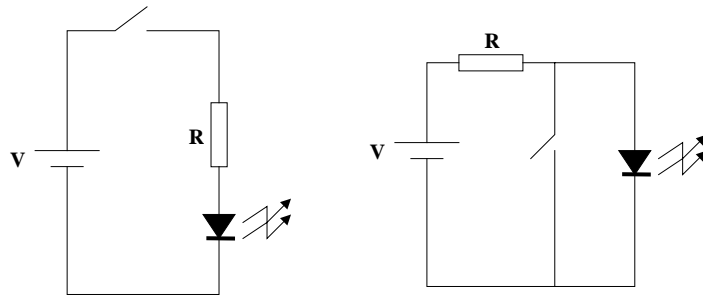
La respuesta espectral es la misma que las células fotoconductoras:



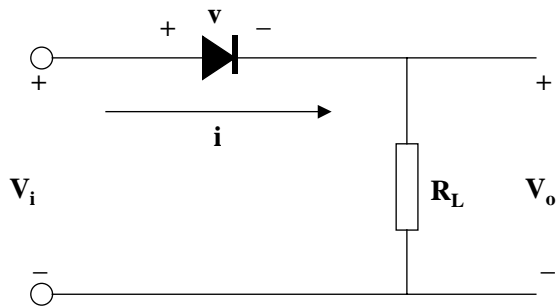
DIODOS EMISORES DE LUZ (LED)

- Uniones P-N polarizadas en sentido directo con elevada impurificación ($V_{\gamma} \approx 1 \text{ v.}$)
- Materiales especiales para producir luz en la recombinación, como es el AsGa
- Se denominan diodos LED (Light Emitting Diode)
- Tensiones inversas bajas -> destrucción por sobretensión
- Corrientes reducidas (típicas de 10, 20 mA) -> destrucción por sobrecorriente

A continuación se pueden ver dos montajes prácticos de este tipo de diodos:

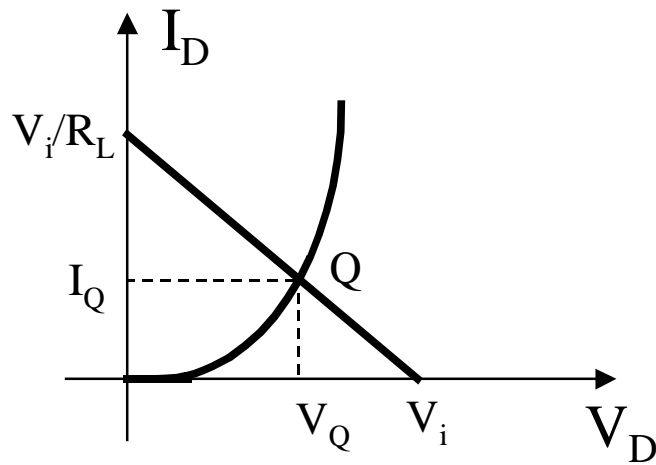


CIRCUITO BÁSICO. CONCEPTO DE RECTA DE CARGA



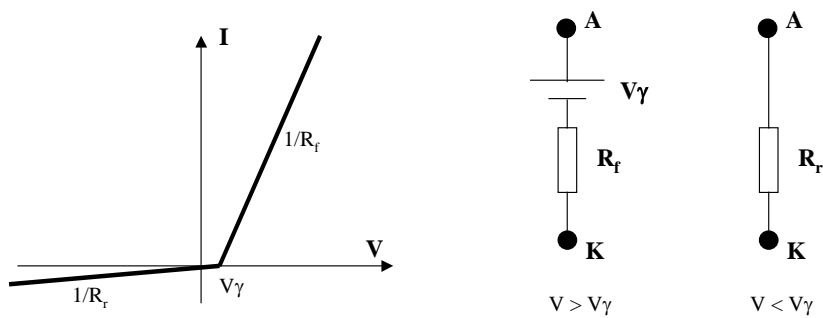
recta de carga: $v = V_i - i R_L$

Su intersección con la característica del diodo da el punto de trabajo de éste.



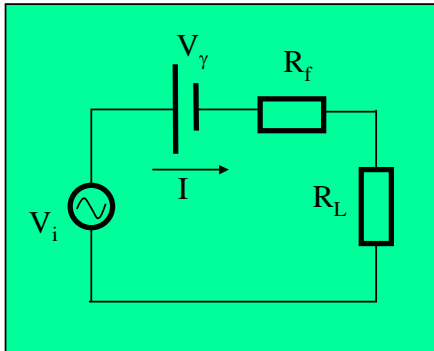
Si $V_i = V_m \text{ sen } \alpha$; $\alpha = \omega t$; $\omega = 2 \pi f$

Y utilizando el modelo lineal aproximado del diodo:

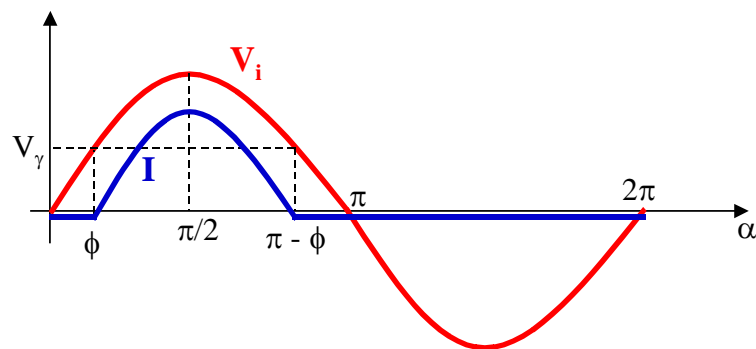
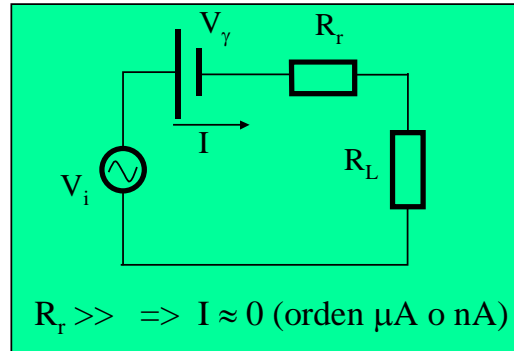


ANOTACIONES

Para $V_i \geq V_\gamma$:



Para $V_i < V_\gamma$:



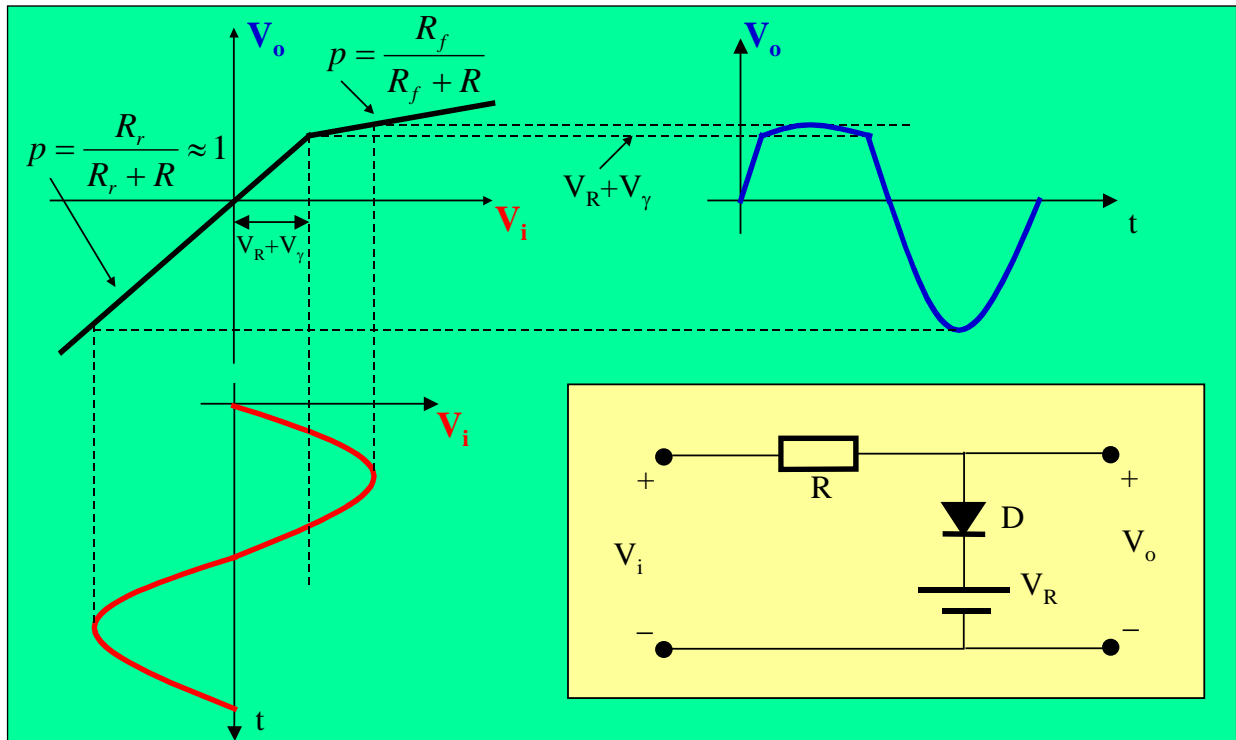
$$i = \frac{V_m \text{sen} \alpha - V_\gamma}{R_L + R_f}$$

para $\alpha = \phi \rightarrow V_m \text{sen} \phi - V_\gamma = 0$

$\phi = \arcsen (V_\gamma/V_m) \rightarrow$ ángulo de inicio de conducción

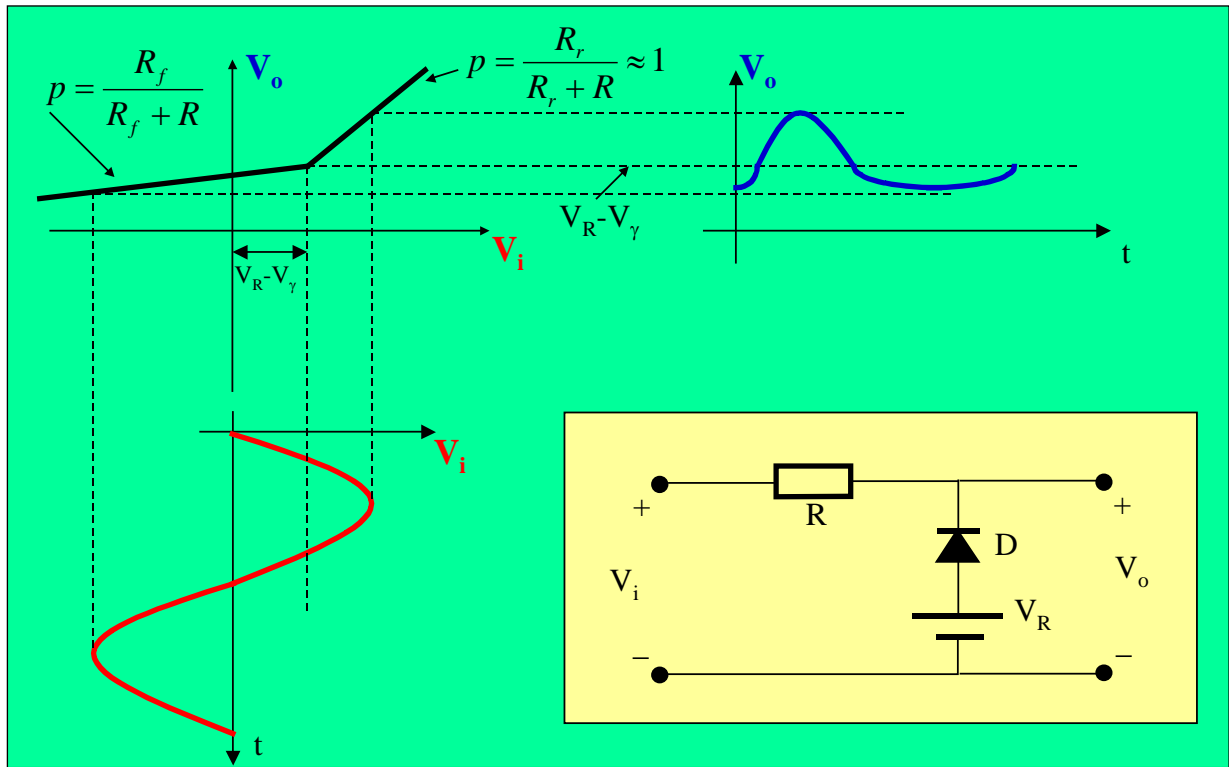
CIRCUITOS RECORTADORES

Circuito recortador que transmite la parte de la señal de entrada que es más negativa que $V_R + V_\gamma$

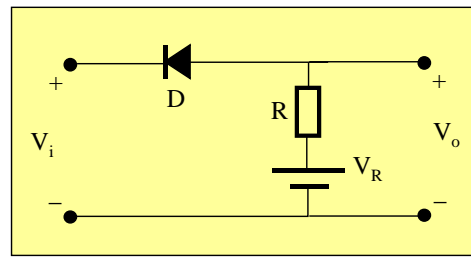
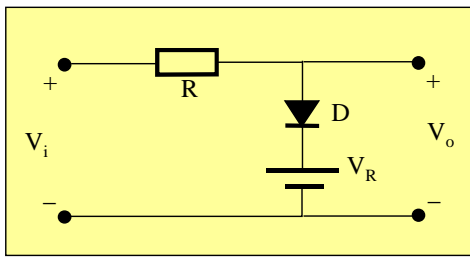


ANOTACIONES

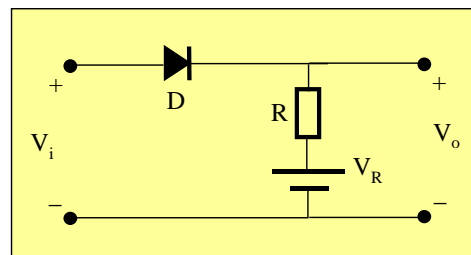
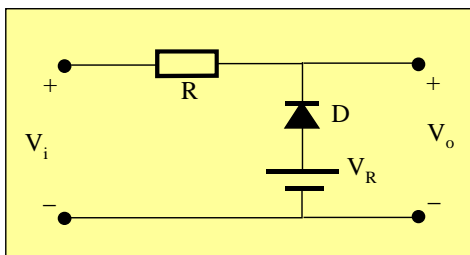
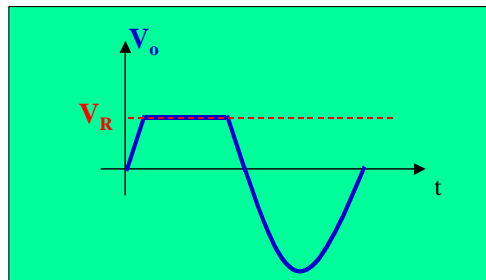
Circuito recortador que transmite la parte de la señal de entrada que es más positiva que $V_R - V_\gamma$



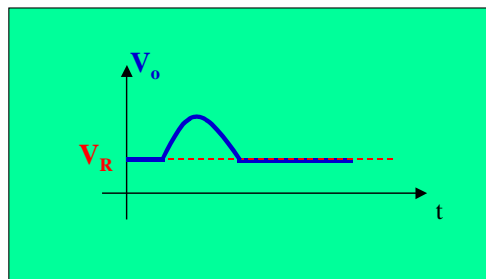
Otros circuitos recortadores



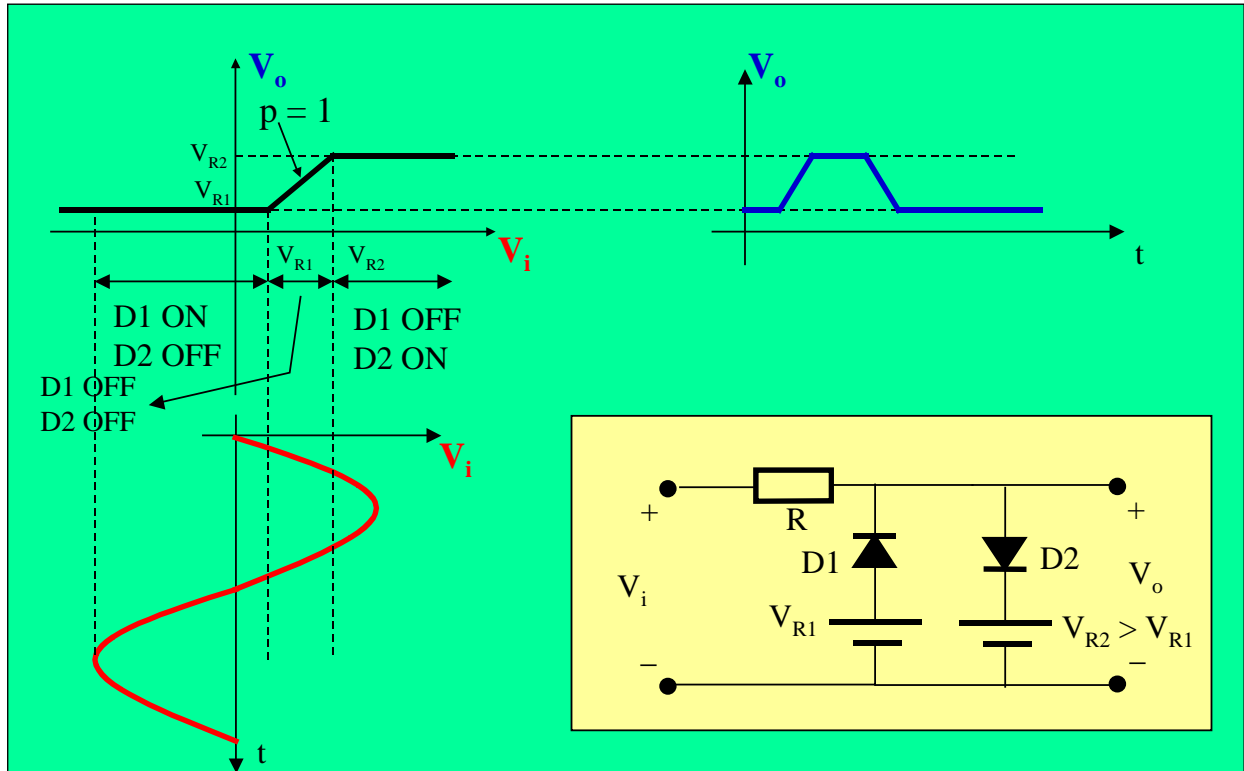
DIODOS IDEALES



DIODOS IDEALES

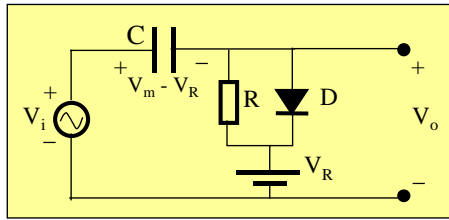


Circuito recortador a 2 niveles (circuito rebanador)

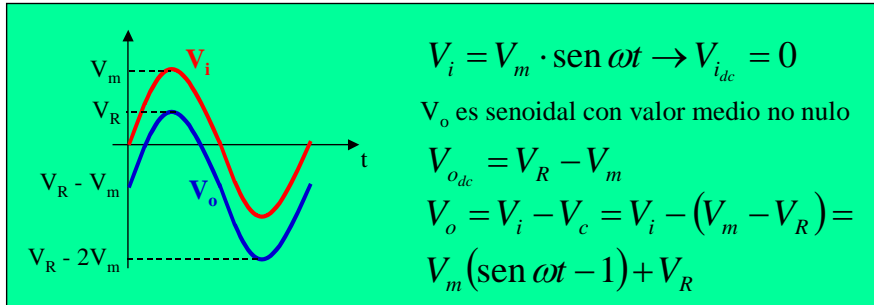


CIRCUITOS FIJADORES O LIMITADORES

Cambian el nivel de continua de la señal de entrada.

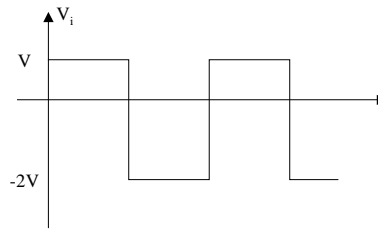
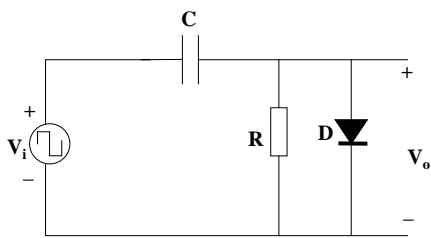


Suponiendo el diodo D ideal, y cumpliéndose que $R \cdot C \gg T$ y $V_m > V_R$

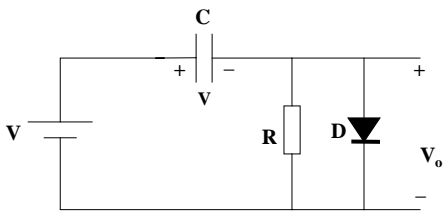


La ventaja de los circuitos fijadores con respecto a los recortadores es que limitan la señal de entrada pero sin deformarla.

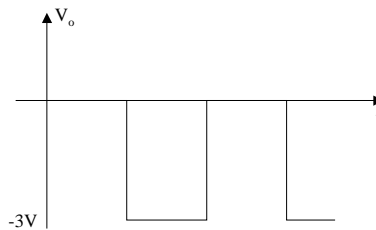
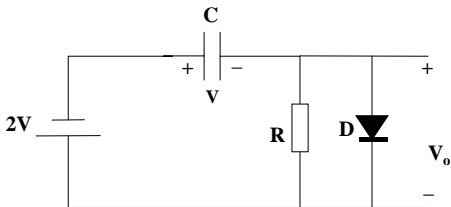
Ejemplo: D ideal, $RC \gg T/2$, valor práctico $RC = 5T \Rightarrow$ en $T/2$ el condensador no se descarga prácticamente.



Primer semiperíodo



Segundo semiperíodo

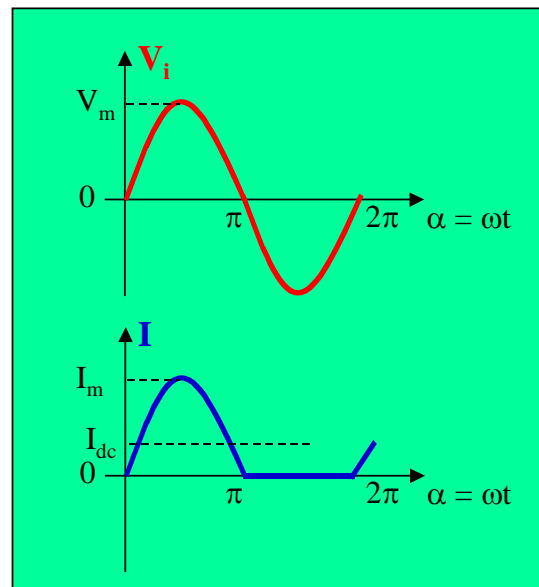
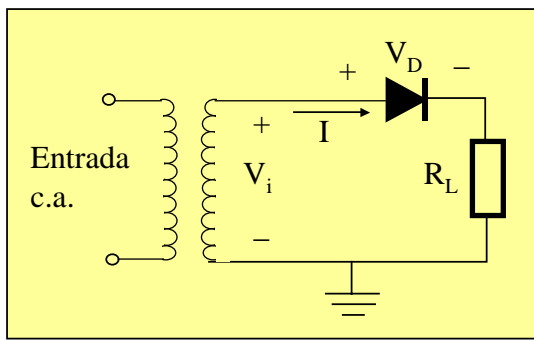


ANOTACIONES

CIRCUITOS RECTIFICADORES

Rectificador: Circuito que convierte una onda senoidal de entrada en una señal unipolar con componente media no nula.

Rectificador de media onda

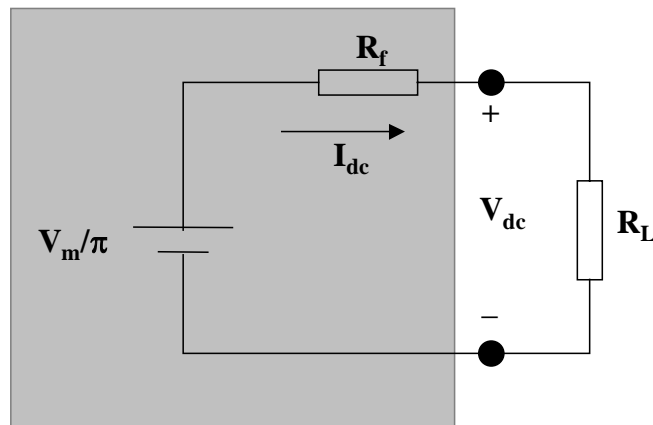


Regulación: Representa la variación de la tensión continua de salida en función de la corriente continua en la carga.

$$\% \text{reg.} = \frac{V_{dc \text{ vacio}} - V_{dc \text{ carga}}}{V_{dc \text{ carga}}} 100$$

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{V_m}{R_f + R_L} \frac{1}{\pi} \Rightarrow \frac{V_m}{\pi} = I_{dc} R_f + I_{dc} R_L = I_{dc} R_f + V_{dc} \Rightarrow V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} - I_{dc} R_f$$

El resultado anterior implica que el equivalente Thevenin del rectificador de media onda es el siguiente:



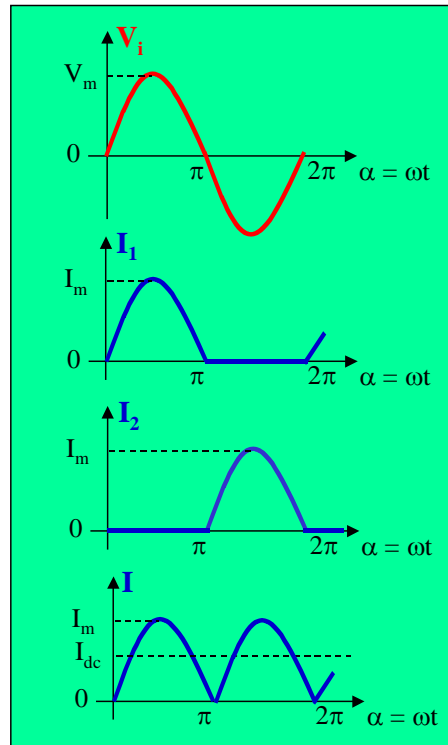
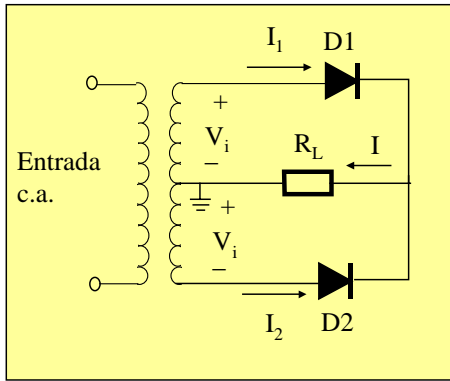
Si $R_L = \infty$ ó $R_L \gg R_f$ entonces $V_{dc \text{ vacio}} = V_{dc \text{ carga}} \Rightarrow \% \text{reg.} = 0$

Si $R_L = 0$ entonces $V_{dc \text{ carga}} = 0 \Rightarrow \% \text{reg.} = \infty$

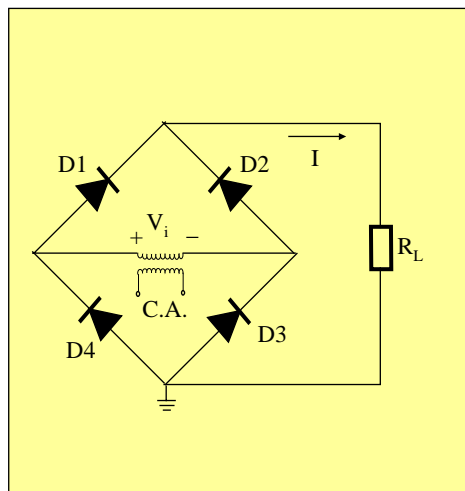
Teorema de Thevenin:

Dos terminales cualesquiera de una red lineal pueden reemplazarse por un generador de fuerza electromotriz igual a la tensión en circuito abierto entre los terminales, en serie con la impedancia de salida vista desde estos puntos.

Rectificador de onda completa

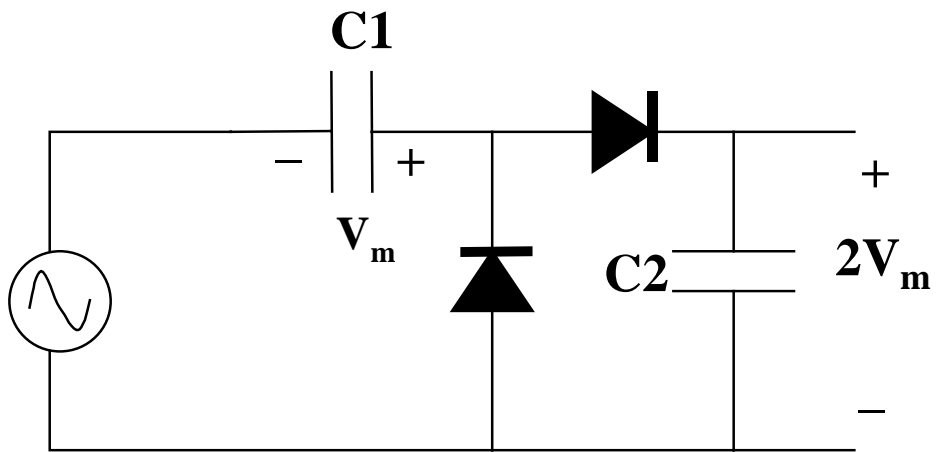


Rectificador en puente



ANOTACIONES

DOBLADOR DE TENSIÓN

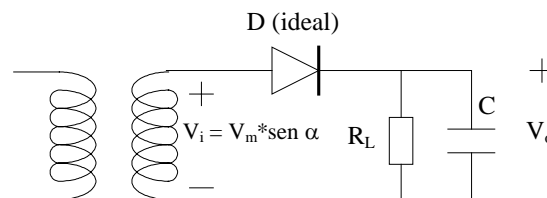


FILTRADO CON CONDENSADORES

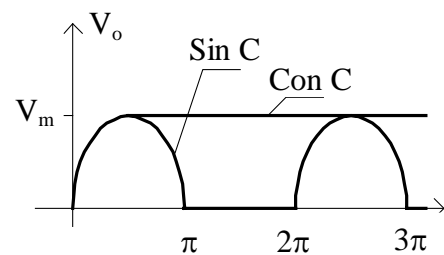
A partir de una señal rectificada es posible obtener una tensión continua. El mecanismo para obtener la misma es el filtrado en baja frecuencia de dicha señal rectificada. En este apartado se aborda el análisis del filtrado empleando condensadores. De dicho análisis se obtendrá por un lado un conocimiento del funcionamiento del mismo, y por otro un método de obtención de las características de la señal de salida y de las distintas aproximaciones que son habituales en este tipo de análisis.

Filtrado. Explicación cualitativa

A partir de un circuito rectificador de media onda, como el de la figura, es posible obtener a la salida una señal continua. Esto se logra con la simple adición a dicho circuito de un condensador que actúe como filtro. La misión del condensador es almacenar energía y entregarla a la carga cuando sea preciso.

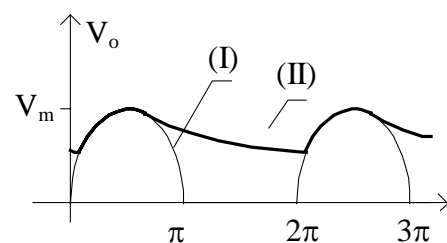


En la siguiente figura se puede ver la salida obtenida en el circuito anterior, si se supone que la carga tenga un valor infinito ($R_L = \infty$). Como se aprecia, la tensión a la salida queda fijada al valor continuo V_m , debido a que el condensador se carga a dicho valor y, al no tener camino para su descarga, queda con esa tensión indefinidamente.



En el caso en que la resistencia de carga tenga un valor finito ($R_L < \infty$), el condensador de filtrado se descargará durante el intervalo de no conducción del diodo. En la siguiente figura podemos observar la onda rectificada (I), y la señal a la salida (II) que muestra cómo se descarga el condensador de forma exponencial.

En función del valor del condensador usado, y de la resistencia de carga, la descarga será más o menos rápida. El efecto final es una tensión de salida variable entre unos márgenes superpuesta a una tensión continua. La tensión variable se denomina *rizado*, y es un parámetro muy importante a la hora de comprobar la calidad de un filtro.



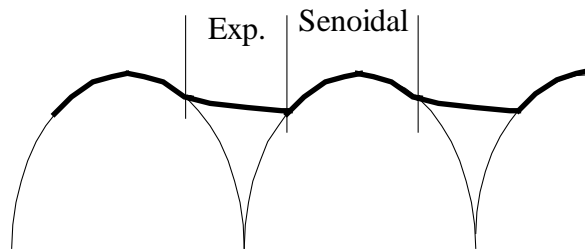
ANOTACIONES

Aproximaciones al rizado

El cálculo del rizado producido en un circuito rectificador con filtro es sencillo pero puede resultar laborioso; por ello generalmente se realizan aproximaciones al mismo, con el objetivo de simplificar los cálculos. Si el condensador se descarga poco, dichas aproximaciones proporcionan unos resultados muy similares a los obtenidos si se realizasen los cálculos completos.

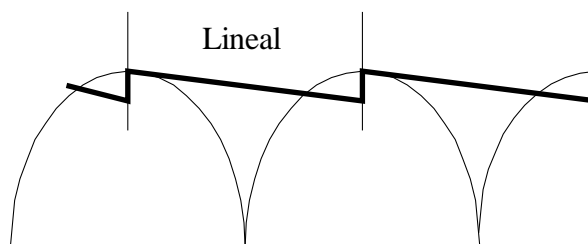
Rizado alto

Si el rizado del circuito es grande, es decir, la parte variable de la tensión de salida es grande comparada con la parte continua, no es posible realizar aproximaciones de ningún tipo, y se hace necesario emplear el modelo real. En la figura se aprecia el aspecto de la señal de salida. En ella podemos observar que la tensión de salida coincide con la del rectificador hasta un punto, a partir del cual la tensión de salida disminuye exponencialmente. En cuanto las tensiones de salida y del rectificador vuelven a igualarse, la tensión de salida pasa otra vez a seguir la onda senoidal.



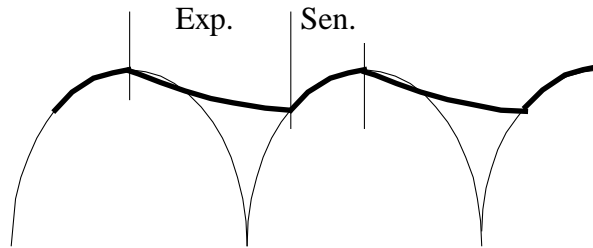
Rizado bajo

En los casos de pequeño rizado, se realizan 3 aproximaciones, que nos proporcionan una onda como la de la figura. En primer lugar se supone que la descarga del condensador es lineal, en segundo lugar que dicha descarga comienza justo en el punto de tensión máxima de la señal rectificada, y en tercer lugar se supone que el condensador se descarga hasta el instante en que la tensión rectificada vuelve a alcanzar su máximo valor.



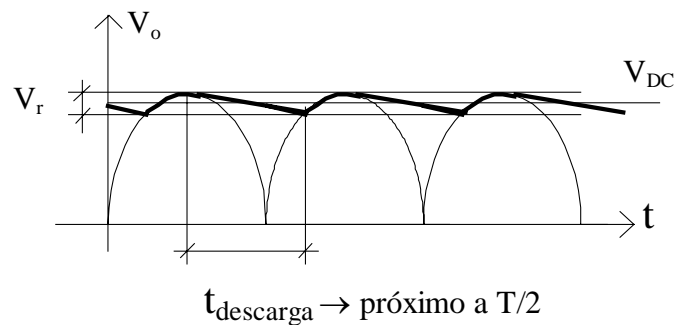
Rizado medio

En el caso de tener un rizado medio, se suele aproximar tal y como aparece en la figura, es decir, se considera una descarga exponencial, que dicha descarga comienza cuando la señal rectificada pasa por su punto máximo, y que el condensador se descarga hasta que encuentra de nuevo la señal rectificada.

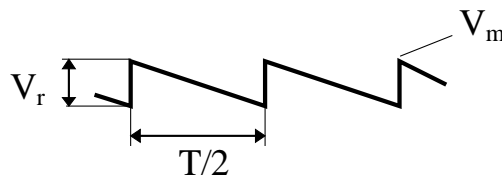


Ejemplo de cálculo

Supongamos un *rectificador de onda completa*, en el que se verifica $R_L * C \gg T/2$ (por lo que suponemos un rizado bajo, y tomamos la aproximación lineal comentada anteriormente). El análisis sería el siguiente:



En la figura anterior podemos ver las distintas tensiones y tiempos que se emplearán en el análisis. Hay que tener en cuenta que, como se supone un rizado bajo, la señal que consideramos de salida es una onda en diente de sierra como la siguiente:



A partir de esta señal, deducimos que la tensión de continua a la salida viene dada como: $V_{dc} = V_m - V_r / 2$, donde V_m es la tensión de pico de la señal rectificadora. Se observa de dicha tensión de continua es la tensión de pico menos el valor medio del rizado, el cual en este caso sencillo coincide con $V_r/2$

El condensador se descarga linealmente durante $T/2$, luego la carga perdida se puede expresar como: $I_{dc} \frac{T}{2}$, y nos queda que la tensión de rizado y de continua vienen dadas por las ecuaciones:

$$V_r = \frac{Q}{C} = \frac{I_{dc}T}{2C} = \frac{I_{dc}}{2fC}$$

$$\Rightarrow V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} = V_m - \frac{I_{dc}}{4fC}$$

En las fórmulas anteriores podemos observar que el rizado aumenta con I_{dc} (\uparrow cuando $R_L \downarrow$), y disminuye con C y f .

El rizado se puede definir como:

$$r = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \rightarrow \begin{cases} V_{rms}: \text{Valor eficaz de la componente alterna (root mean square)} \\ V_{dc}: \text{Componente continua} \end{cases}$$

Obtenemos el valor eficaz de la componente alterna aplicando la definición, y nos queda:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[\frac{V_r}{2} - \frac{V_r}{\pi} \alpha \right]^2 d\alpha} = V_r \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\alpha}{4} + \frac{\alpha^3}{3\pi^2} - \frac{\alpha^2}{2\pi} \right]_0^\pi} = \frac{V_r}{2\sqrt{3}}$$

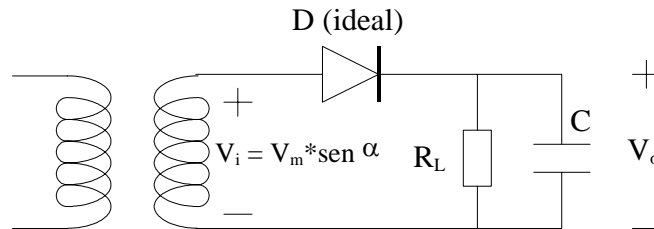
Ahora sustituimos el valor V_{rms} obtenido en la fórmula del rizado:

$$\Rightarrow r = \frac{V_r}{2\sqrt{3}V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3}fCV_{dc}} = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L}$$

De nuevo se deduce que r disminuye con f , C y R_L

Detector de picos o demodulador de AM

El circuito rectificador de media onda con un filtro condensador se puede emplear para detectar los valores de pico de las ondas de entrada. Sirve para extraer la señal de información que se modula en amplitud (por ejemplo en transmisión radiofónica), denominándose a este proceso demodulación.



Para esto el periodo de la portadora tiene que ser mucho menor que la constante de carga del condensador y esta mucho menor que el periodo de la señal moduladora:

$$T_{\text{portadora}} \ll RC \ll T_{\text{moduladora}}$$