

Tema 5. Diodo y rectificación

Índice

La unión p-n. El diodo de unión

Principio básico de operación. Característica I-V

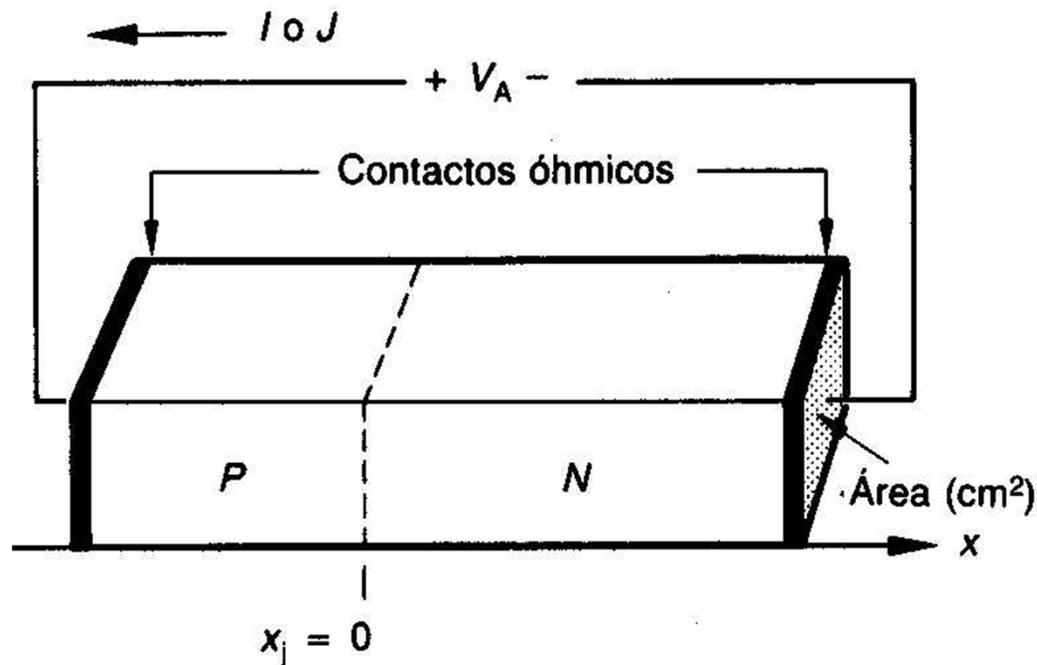
Modelos circuitales del diodo

El diodo Zener. Otros tipos de diodos

Circuitos básicos con diodos. Rectificación.

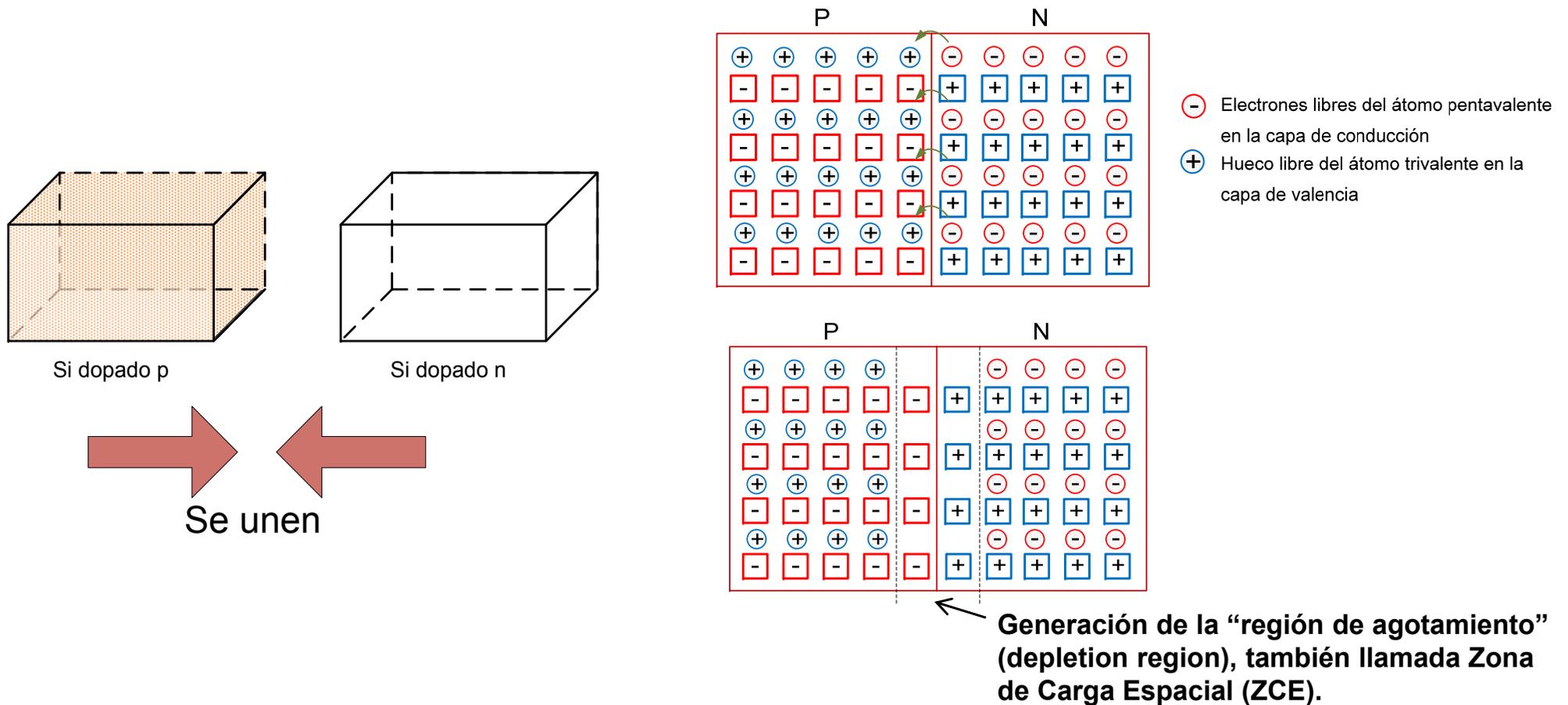
El Diodo de Unión

- ✓ Cuando un semiconductor **dopado tipo P** y un semiconductor **dopado tipo N** se ponen en contacto, se forma una unión P-N.
- ✓ Si realizamos un “buen” contacto eléctrico (denominado contacto óhmico) en cada zona, tenemos un dispositivo electrónico llamado **diodo de unión**.



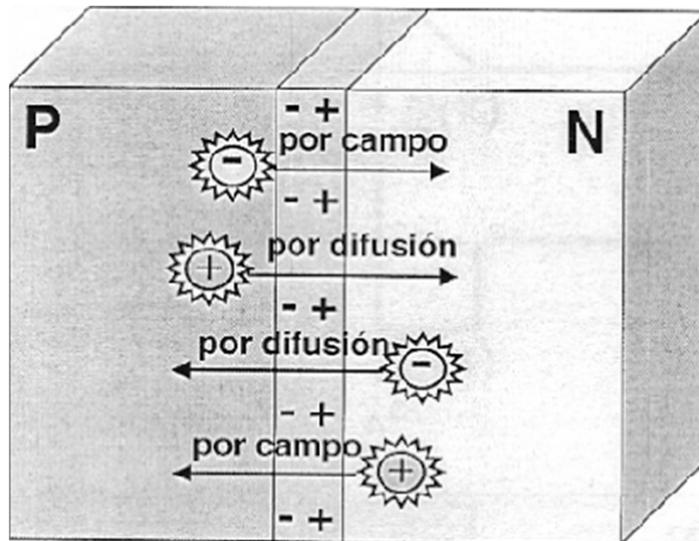
- V_A o V_D : tensión aplicada al diodo (V)
- I_D : corriente del diodo (A)
- J_D : densidad de corriente, $I/\text{Área}$ (A/cm^2)
- x_j : posición de la unión (m)

- Al formar la unión P-N, dado que la zona dopada tipo N posee menos huecos que la zona tipo P, **los electrones libres de la zona N SE DIFUNDEN** hacia la zona P, ocupando los huecos libres existentes en la zona P.



- En las proximidades de la unión p-n **sólo quedan átomos de IMPUREZAS** cargadas (ya que dichos átomos son inmóviles), creando la denominada **Zona de Carga Espacial**

- Según las reglas de la difusión, dicho proceso de difusión de portadores de carga idealmente continuaría hasta que las concentraciones de electrones y huecos se igualaran a ambos lados de la unión.
- Sin embargo, dado que los huecos de la zona P “dejan atrás” iones negativos y los electrones de la zona N “dejan atrás” iones positivos, dichas cargas fijas de la red cristalina crean un campo eléctrico QUE SE OPONE a la difusión de electrones y huecos.

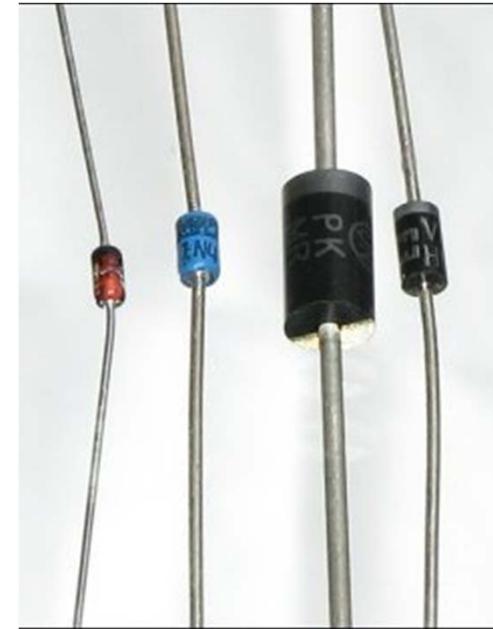
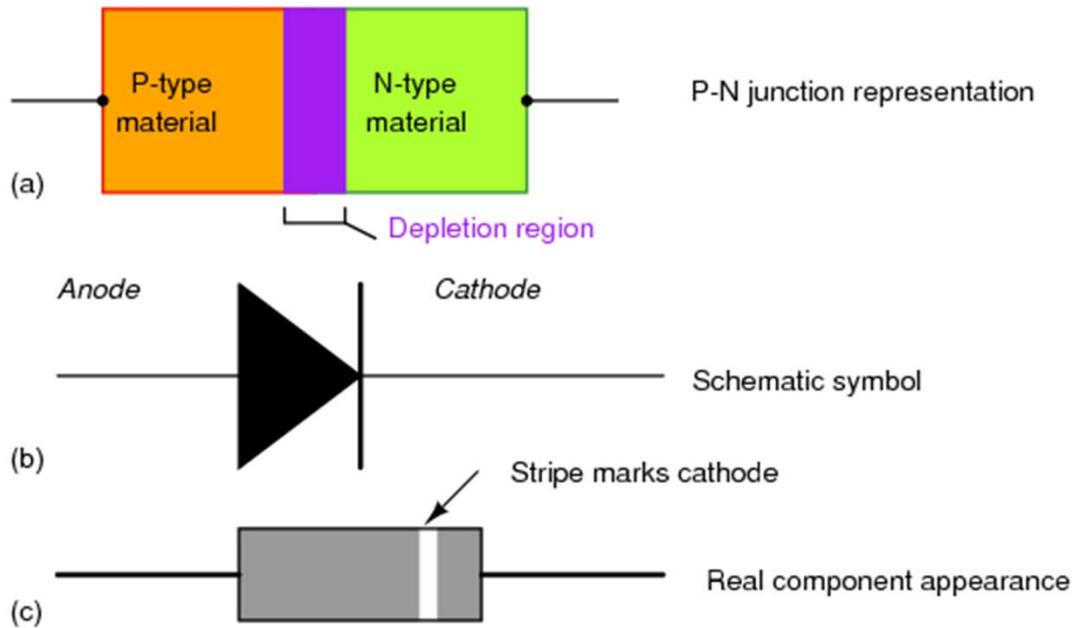


Campo Eléctrico

¿Se difunden entonces todos los e^- y h^+ ?

NO, se llega a una situación de equilibrio, donde difusión (en un sentido) y arrastre (en sentido opuesto) **SE IGUALAN** tanto para electrones como para huecos.

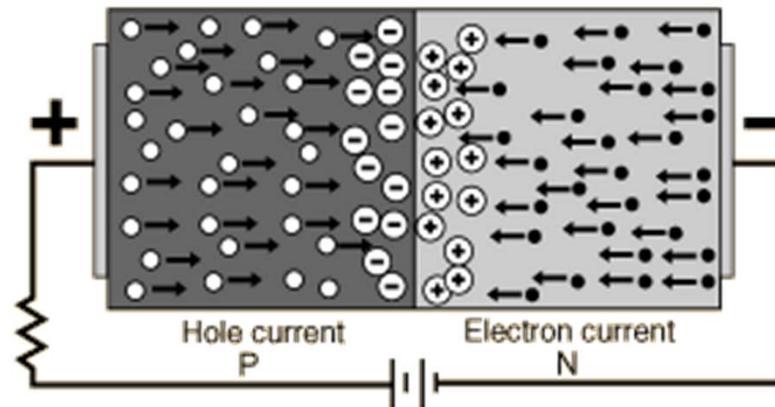
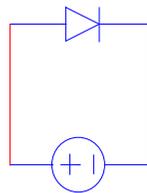
Símbolo circuital del diodo. Encapsulados



Principio básico de operación del diodo

- ✓ El **comportamiento eléctrico del diodo** (curva característica, es decir, corriente del diodo en función de la tensión aplicada al mismo) depende **DIRECTAMENTE** de lo que ocurre en la **ZCE**. Se resume en lo siguiente:

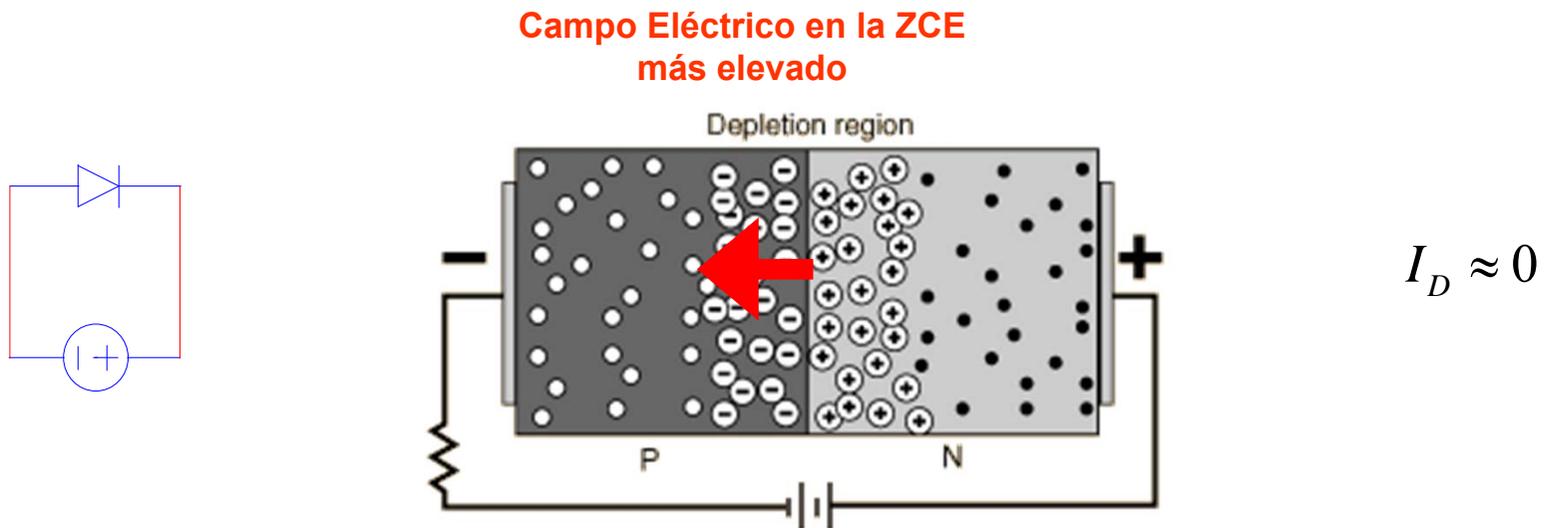
a) **POLARIZACIÓN DIRECTA:** Cuando apliquemos una tensión V_D **positiva** (zona P a más tensión que la zona N) disminuye el campo eléctrico en la ZCE y se rompe el equilibrio. Se favorece **la difusión de portadores** (huecos de la zona P hacia la zona N y electrones de la zona N hacia la zona P): **se crean corrientes muy elevadas.**



Principio básico de operación del diodo

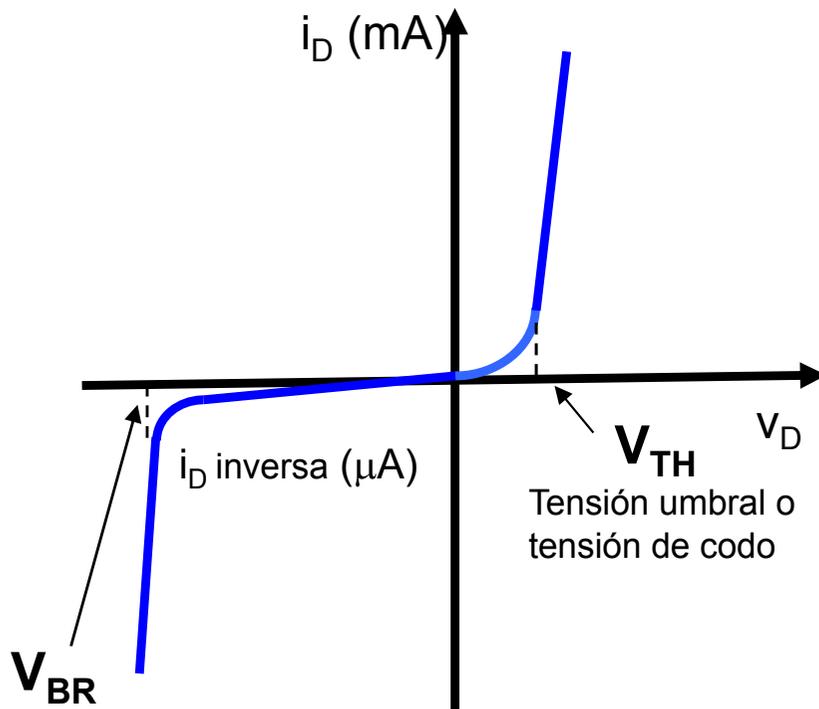
b) **POLARIZACIÓN INVERSA:** Si la tensión V_A aplicada es **negativa** (zona P a menor tensión que la zona N) el campo eléctrico en la ZCE crece.

Ahora se favorece el arrastre de huecos de la zona N hacia la zona P y de electrones de la zona P a la N. Como hay muy pocos, la corriente que circula por el diodo (de N hacia P) es ahora muy pequeña y casi independiente de la tensión.



Característica I-V de la unión PN

$$i_D = I_S (e^{e \cdot V_D / \eta k T} - 1) = I_S (e^{V_D / \eta V_T} - 1)$$



V_D voltaje aplicado al diodo

i_D corriente del diodo

I_S corriente inversa de saturación =

f(T, concentración de portadores, área de unión...)

10^{-8} - 10^{-14} : dispositivos discretos de Si;

10^{-16} : en un diodo de C.I.

η coeficiente de emisión

1 (C.I o diodos discretos que operan con más de 10mA)

2 (diodos discretos de Si que operan hasta 10mA)

$V_T = kT/q$ (V_T tensión térmica, $25,9$ mV a $300K$: K cte de Boltzmann, T temperatura, q carga del electrón)

V_{TH} voltaje umbral ($0,6 - 0,8V$ para diodos de Si;

$0,2 - 0,3V$ para diodos de Ge; $0,9 - 1,1V$ en GaAs)

V_{BR} voltaje o tensión de ruptura (breakdown), a la que aparece una corriente muy elevada en polarización inversa ($-50V$ para diodos convencionales de Si).

Tensión de ruptura

Modelos circuitales del diodo

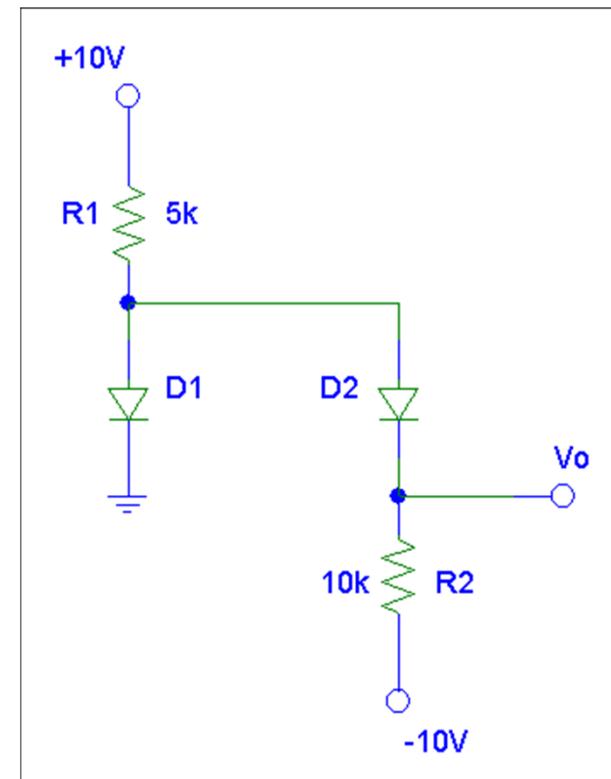
- Cuando se construyen circuitos complejos con diodos, **el cálculo de las tensiones y corrientes en el circuito utilizando la característica I-V del diodo anterior** sólo se puede realizar de manera **numérica** (simulación mediante computador, herramientas de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales...)

$$i_D = I_S (e^{e \cdot V_D / \eta \kappa T} - 1) = I_S (e^{V_D / \eta V_T} - 1)$$

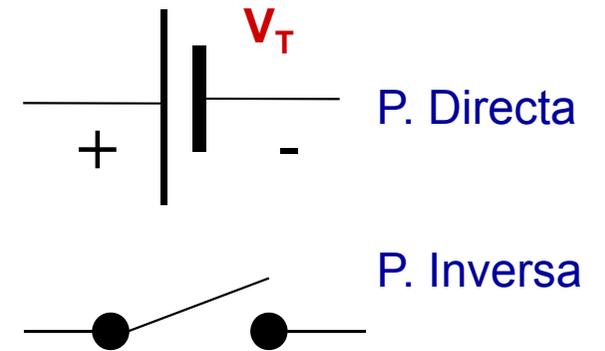
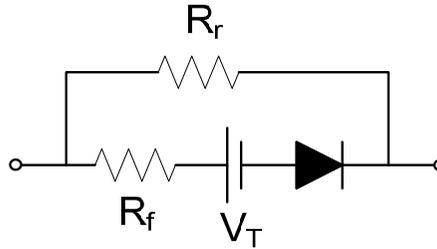
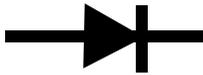


$$V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{i_D}{I_S} + 1 \right)$$

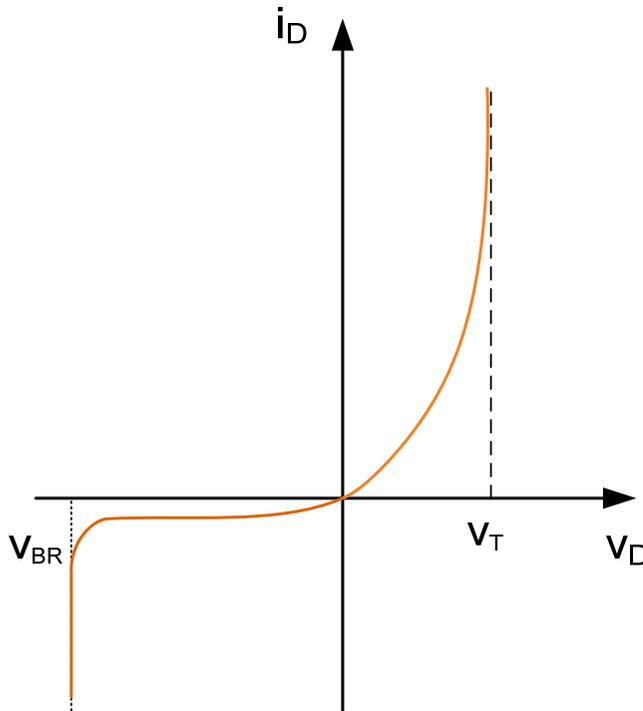
- Por ello, se recurre a **modelos simplificados (llamados modelos circuitales)** del diodo que permitan el análisis y resolución de circuitos de una manera aproximada.



Modelos circuitales del diodo

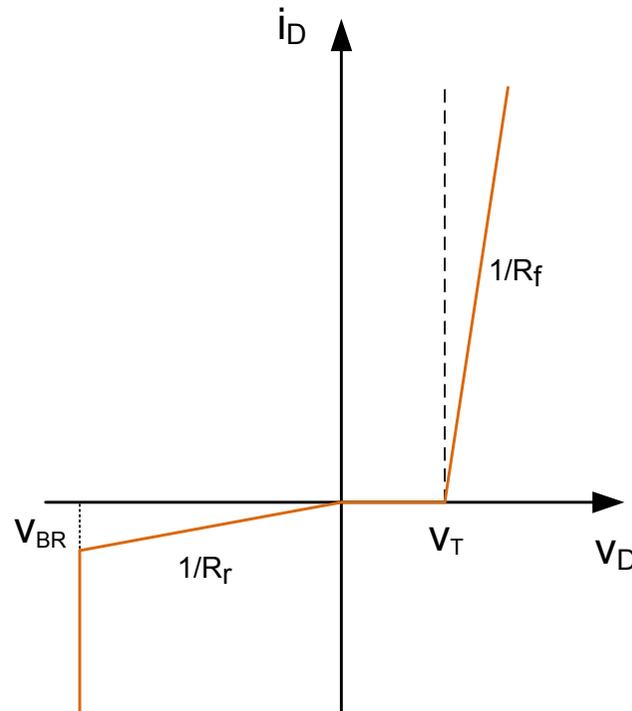


Curva I-V real



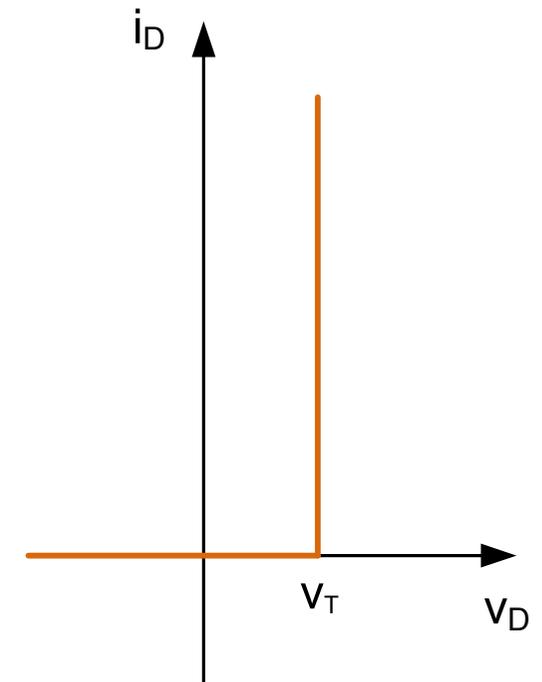
Modelo lineal

Curva V-I aproximada



Modelo de tensión umbral (o de codo).

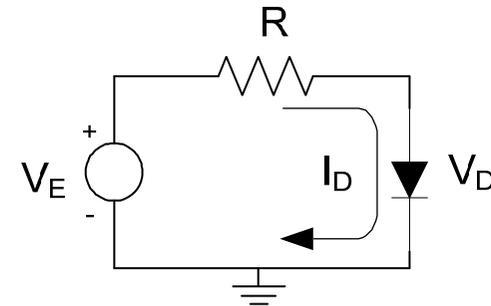
Curva I-V ideal



Recta de carga

- Vamos a analizar el circuito más sencillo: una resistencia R , un diodo y una fuente de tensión continua V_{DD} . *¿Cuánto vale la corriente del circuito y las tensiones en cada elemento?*

Ambos elementos están en serie, luego la corriente (I) del circuito es la misma en el diodo y en la resistencia: $I = I_R = I_D$.



- ✓ Si aplicamos la ley de mallas de Kirchhoff, sustituimos en ella la ley de Ohm (tensión en la resistencia) y despejamos el valor de la corriente:

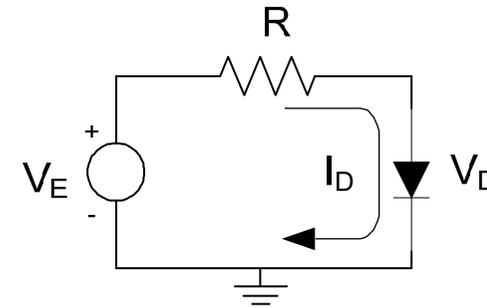
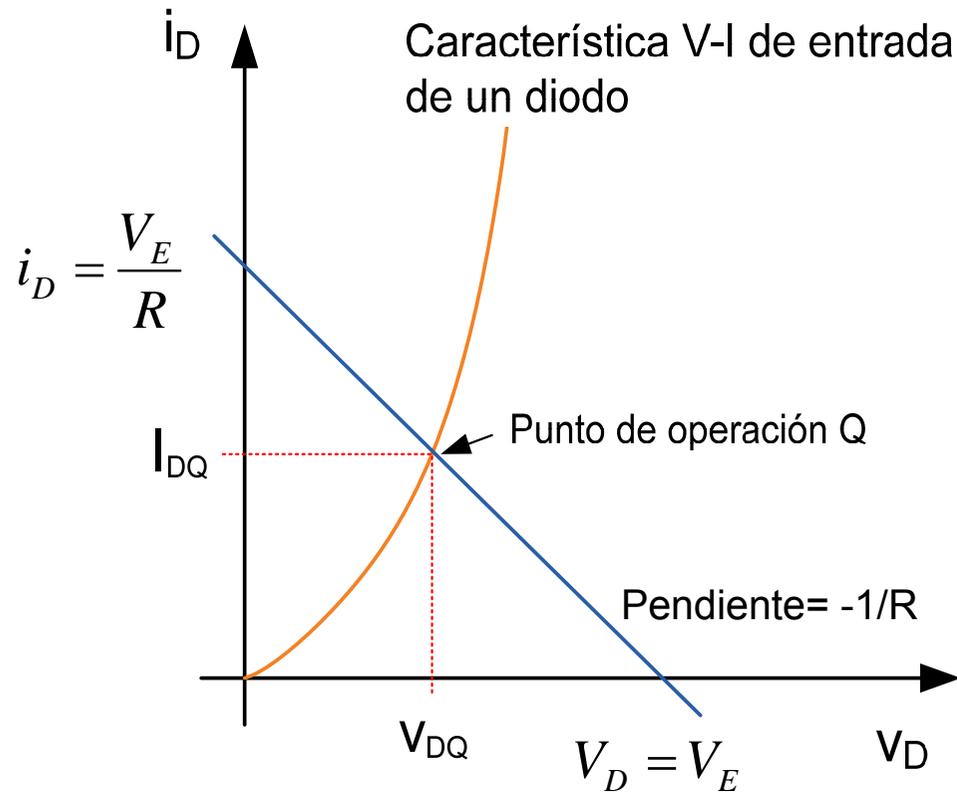
$$V_E = V_R + V_D = I_D \cdot R + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_E - V_D}{R}$$

A esta ecuación se le denomina **RECTA DE CARGA**

- ✓ **La recta de carga del circuito lineal** determina todos los puntos de operación permitidos de dicho dispositivo en el circuito en que se halla.

Punto de trabajo (Q) del diodo

Punto de trabajo Q = (V_{DQ}, I_{DQ}): es la intersección de la recta de carga con la curva característica del componente



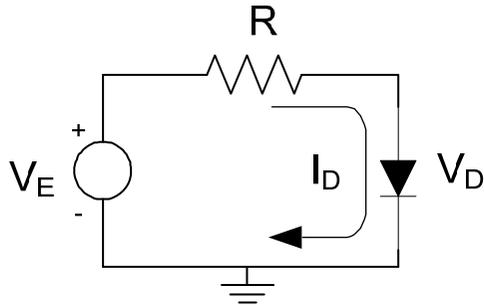
$$V_E = i_D \cdot R + V_D \quad \Rightarrow \quad \frac{V_E - V_D}{R} = I_D;$$

- La recta de carga se dibuja hallando los cortes con los ejes:

$$V_D = 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = \frac{V_E}{R}$$

$$i_D = 0 \quad \Rightarrow \quad V_D = V_E$$

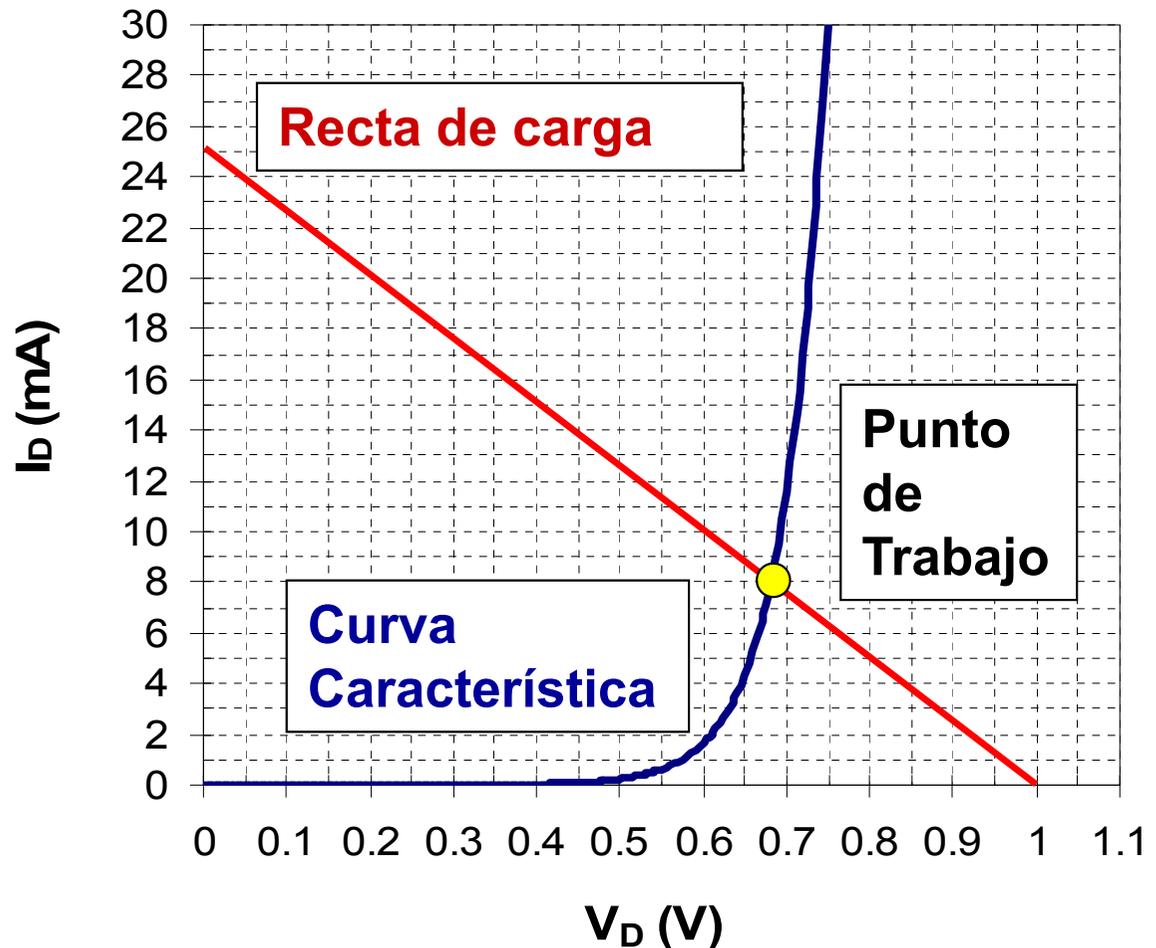
Ejemplo. Cálculo del punto de trabajo



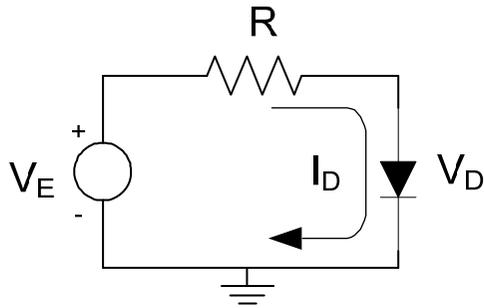
a) Utilizando la curva característica:

- Dibujamos la recta de carga:
 - $V_D = 0, I_D = 1V/40\Omega = 25 \text{ mA}$
 - $I_D = 0, V_D = 1 \text{ V}$
- El punto de trabajo se encuentra en $V_D = 0.68 \text{ V}$, $I_D = 8 \text{ mA}$.
- En la resistencia caen $8\text{mA} \cdot 40\Omega = 0.32 \text{ V}$.

- $V_E = 1 \text{ V}$, $R = 40 \Omega$
- $D = 1\text{N}4002$ de Fairchild, cuya curva característica aparece en la figura.



Ejemplo. Cálculo del punto de trabajo

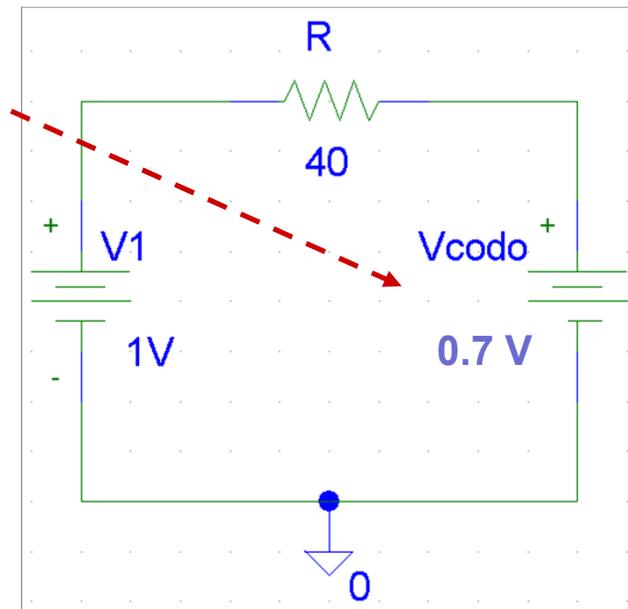


- $V_E = 1 \text{ V}$, $R = 40 \Omega$
- $D = 1\text{N}4002$ de Fairchild, cuya tensión de codo es de aprox. 0.7 V (diodo de Si).

b) Utilizando el modelo de tensión umbral o de codo ($V_T = 0.7 \text{ V}$ en Si):

- Sustituimos el diodo por una fuente a V_T .
- Ahora las corrientes y tensiones son:
 - $I_D = (1 - 0.7)\text{V} / 40\Omega = 7.5 \text{ mA}$
 - $V_D = 0.7 \text{ V}$,
 - $V_R = 7.5 \text{ mA} \cdot 40\Omega = 0.3 \text{ V}$.

- Mediante el modelo de tensión umbral o de codo se obtienen resultados aproximados, pero suele ser más que suficiente en la mayoría de los circuitos prácticos

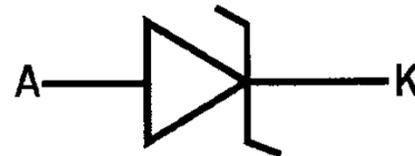
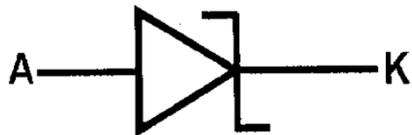


¿Cómo analizar el estado de los diodos en un circuito?

1. Suponer razonadamente el estado de cada diodo (**directa o inversa**).
2. Dibujar el esquema del circuito sustituyendo los diodos por el modelo circuital elegido (del que se dispongan datos), en función de su estado:
 - i. **Diodos en directa (conducción) \Rightarrow modelo circuital.**
 - ii. **Diodos en inversa (corte) \Rightarrow interruptor abierto.**
3. Determinar las corrientes y tensiones en todo el circuito mediante las leyes de Kirchhoff.
4. Comprobar si existen contradicciones con las suposiciones hechas para cada diodo. Habrá contradicción si:
 - i. **Por el cortocircuito pasa una corriente negativa**
 - ii. **En el circuito abierto aparece una tensión positiva.**
5. Si hay alguna contradicción modificar las hipótesis del punto 1. Si no hay contradicciones, los valores de tensión y corriente calculados se aproximarán bastante a los reales.

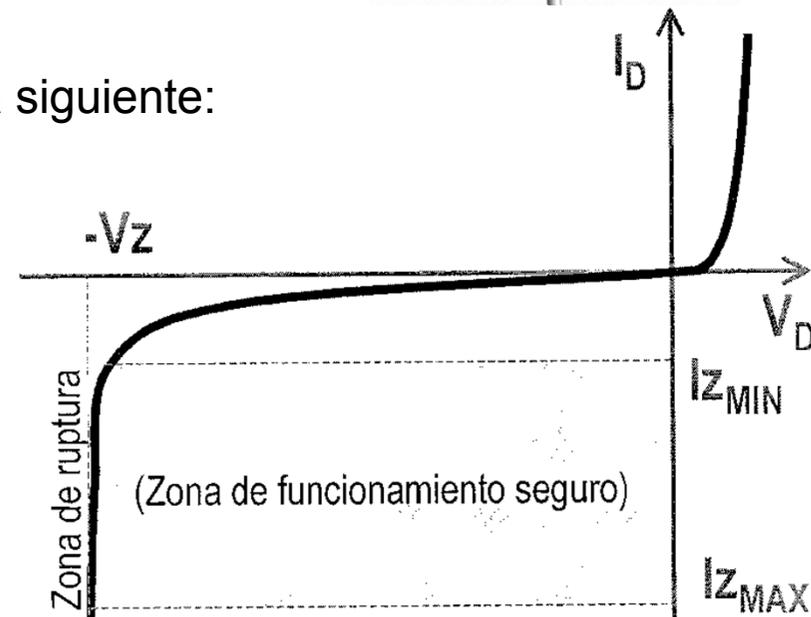
Otros diodos: el diodo Zener

- Un **diodo Zener** es un diodo fabricado especialmente para obtener una **tensión de ruptura en inversa** más reducida que la de los diodos convencionales (del orden de muy pocos voltios) y muy estable, denominada **tensión Zener, V_Z** .
- Los **símbolos circuitales** del diodo Zener son los siguientes:



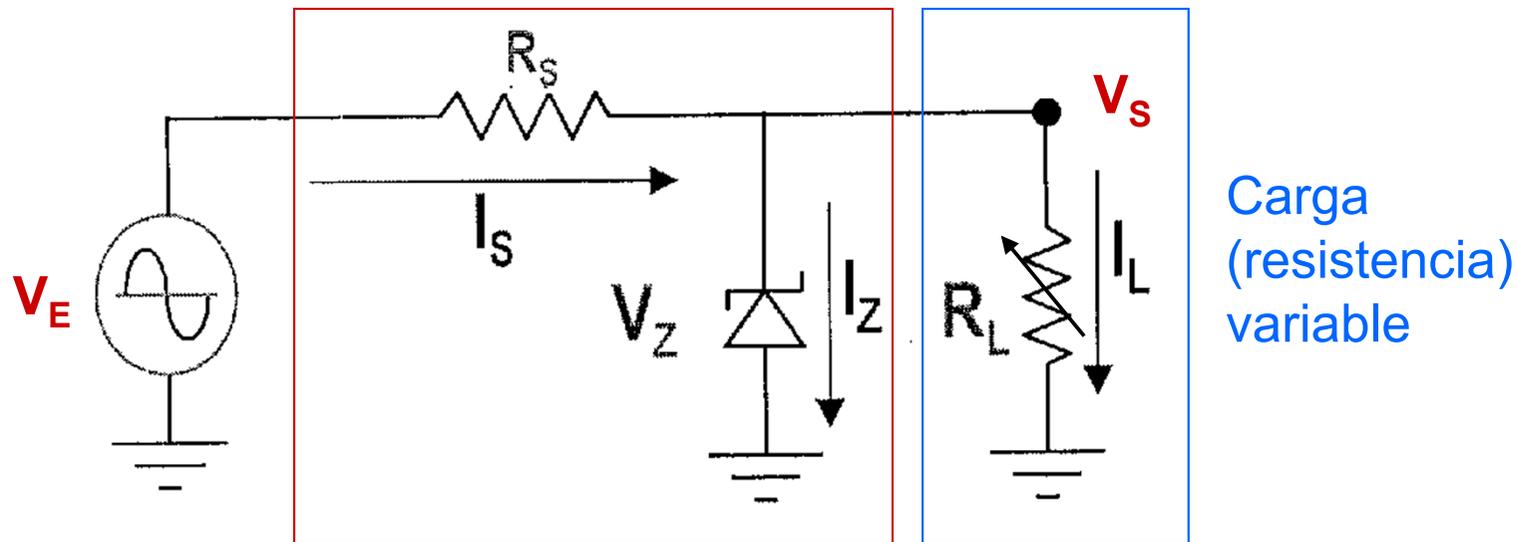
- ✓ La curva característica del diodo Zener es la siguiente:

- V_Z es la **tensión Zener**.
- I_{ZMIN} es la **corriente mínima** necesaria para entrar en la zona de ruptura Zener.
- I_{ZMAX} es la **mayor corriente en ruptura soportada** (dada por la potencia máxima)



Circuito regulador de tensión con diodo Zener

- ✓ La aplicación más importante de los diodos Zener tiene que ver con circuitos donde se necesite una tensión **muy constante y estable**: **circuitos reguladores de tensión**.



Circuito regulador Zener

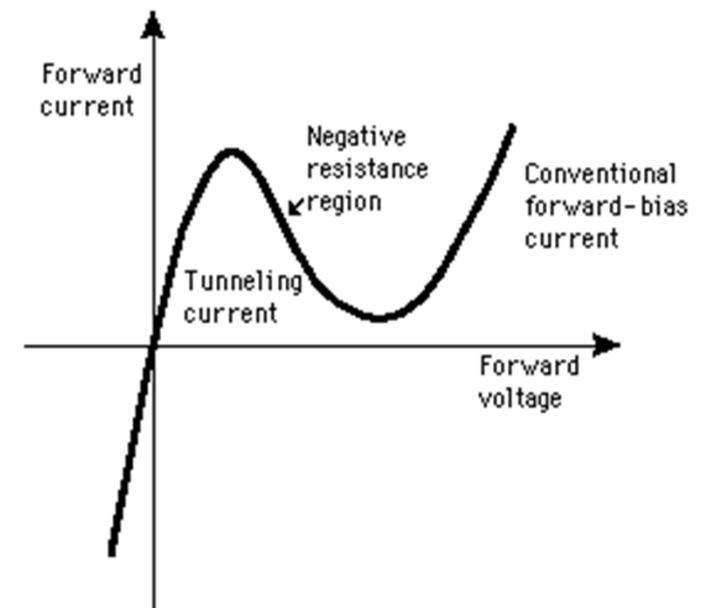
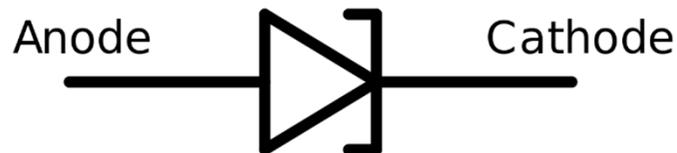
- Si en el circuito anterior se hace circular por el diodo Zener una corriente en inversa entre $I_{Z_{MIN}}$ e $I_{Z_{MAX}}$, la tensión de salida V_S será fija y de valor V_Z . De esta manera, aunque varíe el valor de la resistencia R_L , ésta siempre estará sometida a la misma tensión ($V_S = V_Z$)

Otros diodos

Diodo Schottky: Unión **semiconductor-metal** (unión Schottky), de baja tensión umbral (0,2 - 0,4 V) y mayor rapidez de conmutación. Utilizado en puertas lógicas de muy alta velocidad.

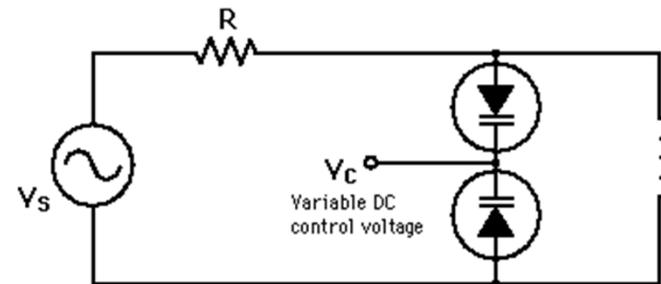


Diodo Túnel: Diodos de **muy alto dopado** en los que se produce el efecto túnel (cuántico), presentado una resistencia negativa en una zona de funcionamiento. Útil en osciladores de alta frecuencia y para conectar células solares en tándem.

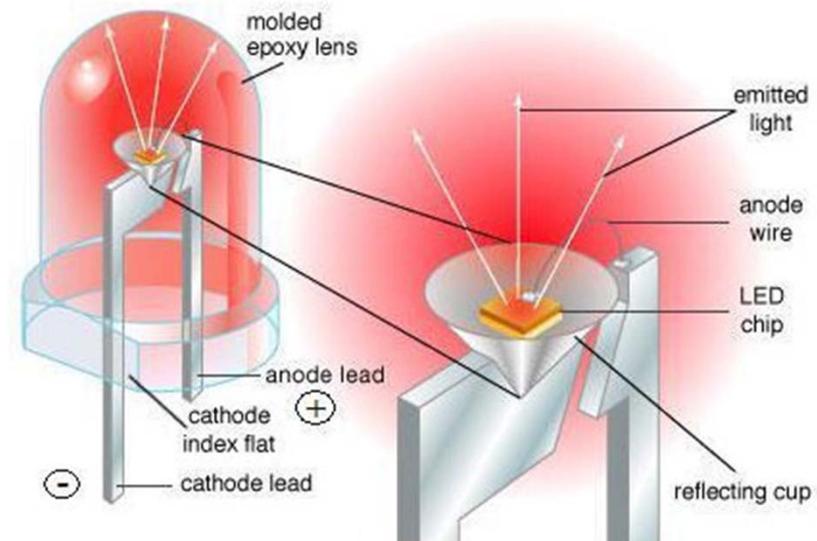
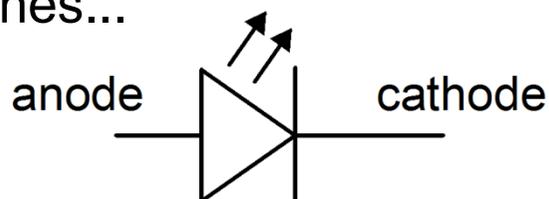


Otros diodos

Diodo varicap o varactor: La unión P-N de un diodo polarizado en inversa se comporta como un **condensador de capacidad variable**: a mayor tensión inversa disminuye la capacidad de la unión. Útil en circuitos de sintonizado RLC, para modificar la frecuencia de resonancia con la tensión aplicada.

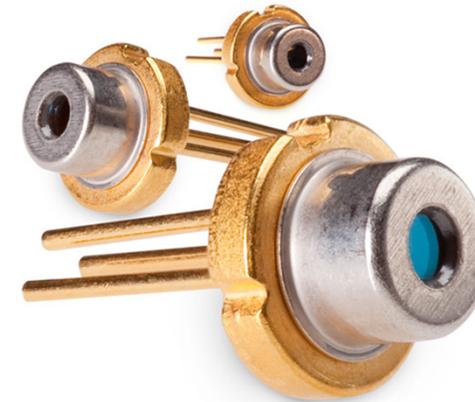
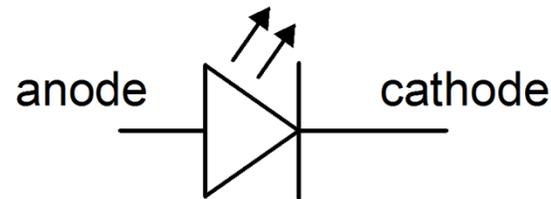


Diodo LED (*Light Emitting Diode*): diodo que **emiten luz** al paso de la corriente. Existen LED de distintas longitudes de onda (**desde el infrarrojo al ultravioleta**) en función del semiconductor en el que esté fabricado. Usados en indicadores, pantallas, comunicaciones...

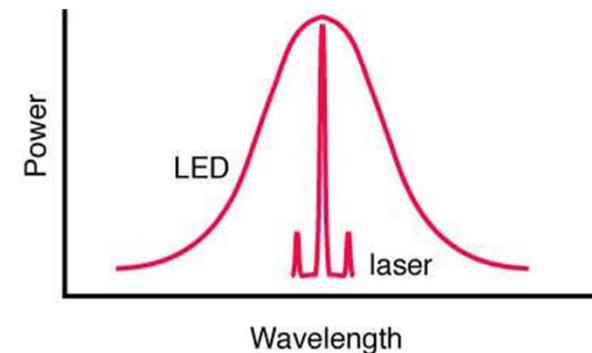
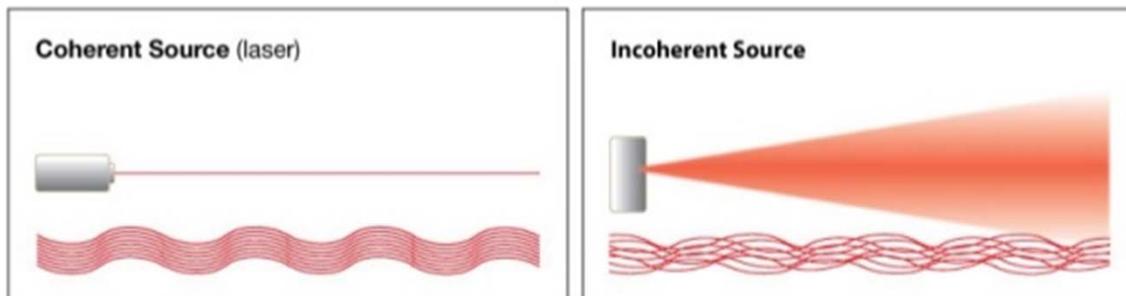


Otros diodos

Diodo Láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la **emisión inducida o estimulada**, para generar un haz de luz coherente espacialmente (haz colimado) y temporalmente (monocromático). Usados en lectores de CD, DVD, comunicaciones ópticas, impresoras láser...



Laser vs. LED



Otros diodos

Célula fotovoltaica (célula solar): Unión p-n que cuando absorbe radiación luminosa produce una tensión y corriente eléctrica (fotocorriente) por **efecto fotovoltaico**. Su objetivo es producir energía eléctrica, luego suelen ser de área elevada.



Fotodiodo: Funciona también por efecto fotovoltaico, pero no se utiliza para producir energía eléctrica sino como **sensor de luz**, por lo que suele ser de tamaño más reducido. Se polariza en inversa, produciendo una fotocorriente proporcional a la radiación incidente. Se usa en comunicaciones ópticas.

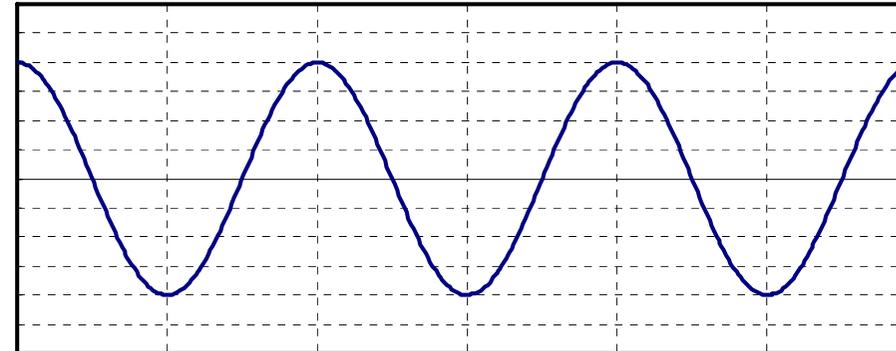
Los **fototransistores** además **amplifican esa corriente**, ganando sensibilidad.

Optoacoplador u optoaislador: La combinación de un diodo LED y un fototransistor en un circuito integrado, que permite **aislar eléctricamente una señal**.



Circuitos con diodos: Rectificadores

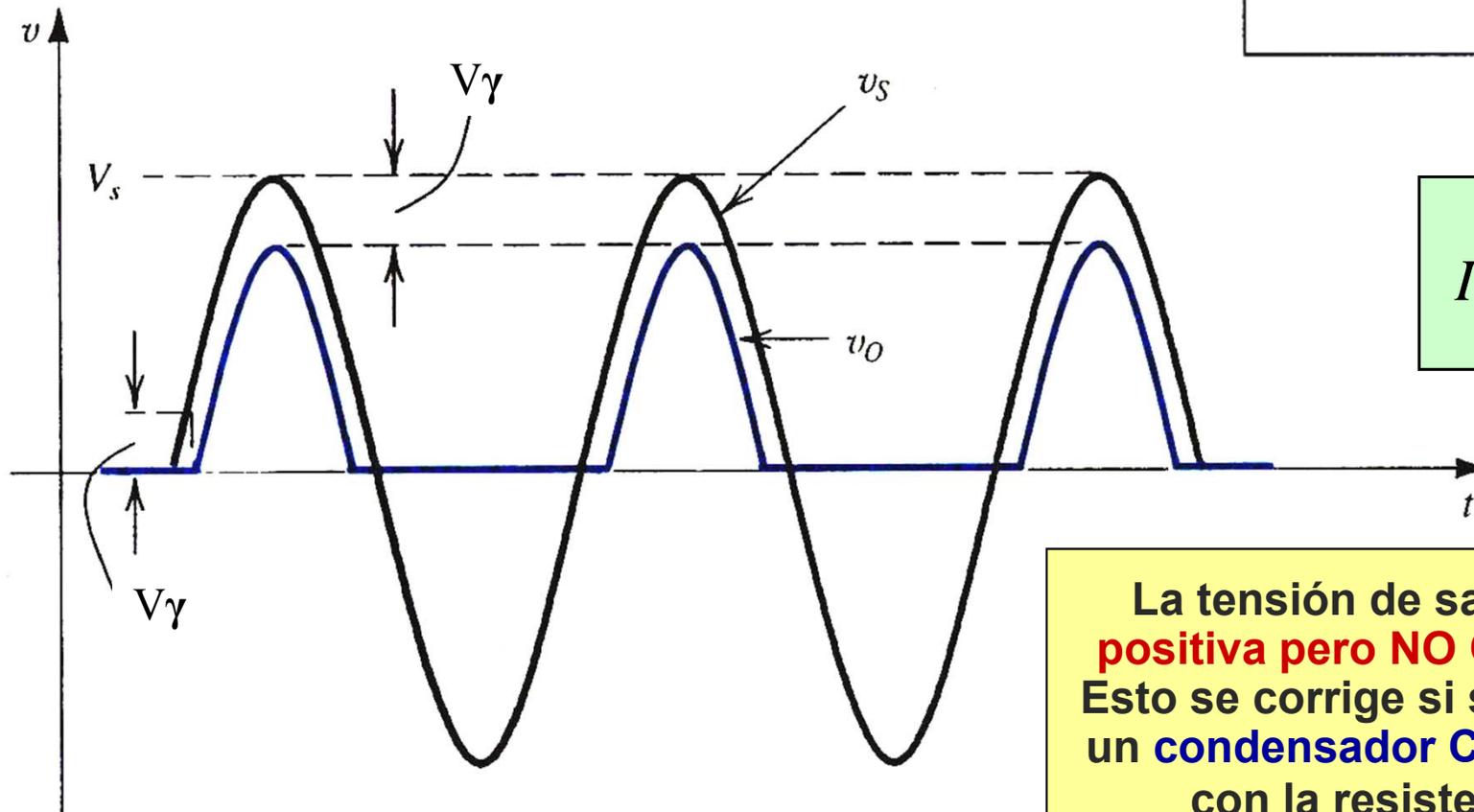
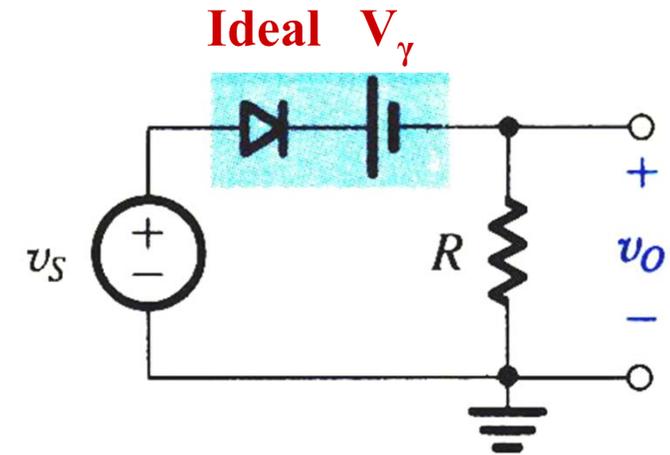
- Un **circuito rectificador ideal** convierte una **tensión alterna** (generalmente sinusoidal) en una **tensión continua**.
- En la práctica, los rectificadores **no son circuitos ideales**, por lo que la tensión continua de salida suele presentar **pequeñas variaciones y no ser perfectamente continua**.
- Los circuitos rectificadores más utilizados son **circuitos con diodos**, entre los que destacan:



- Rectificador de **media onda**
- Rectificador de **onda completa con puente de diodos**

Rectificador de media onda

- El diodo del circuito conducirá sólo si la tensión v_s supera el voltaje de codo. Por ello $v_o = v_s - V_\gamma$ (semiciclos positivos, cuando $v_s > V_\gamma$), y $v_o = 0$ (semiciclos negativos, cuando $v_s < V_\gamma$):

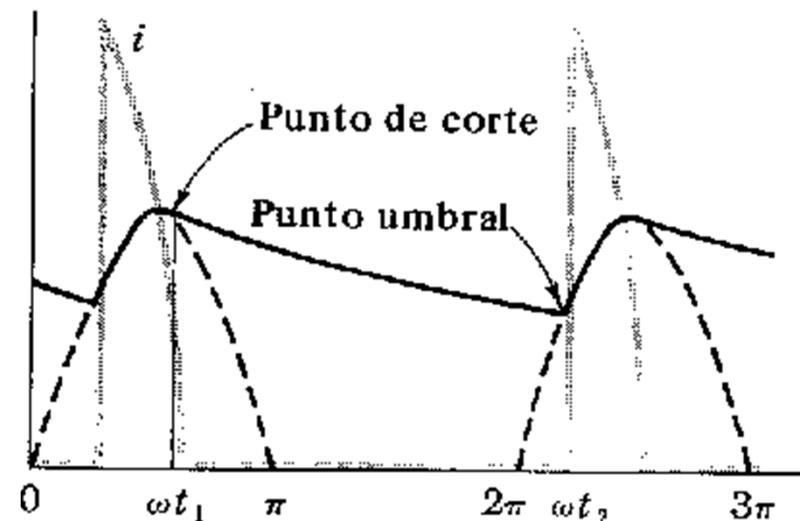
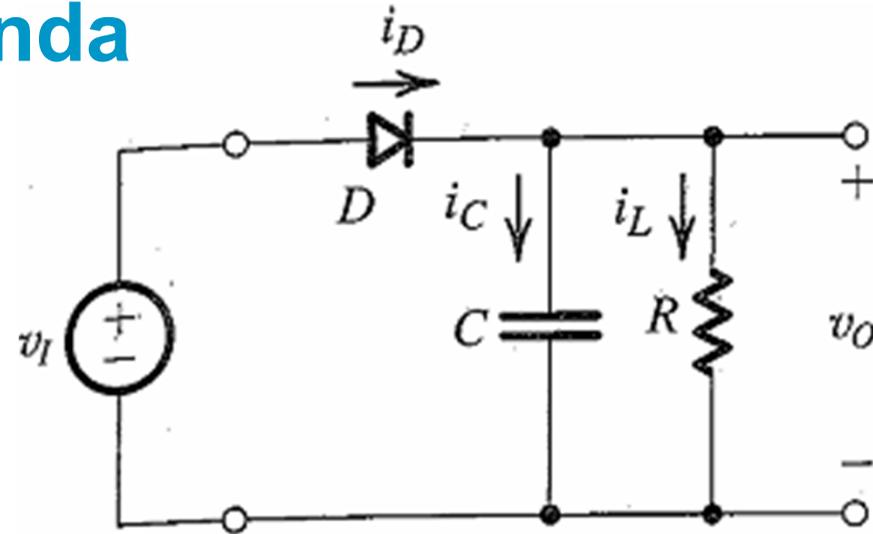


$$I = \frac{v_s - V_\gamma}{R}$$

La tensión de salida v_o es **positiva pero NO CONTINUA**. Esto se corrige si se introduce un **condensador C** en paralelo con la resistencia R.

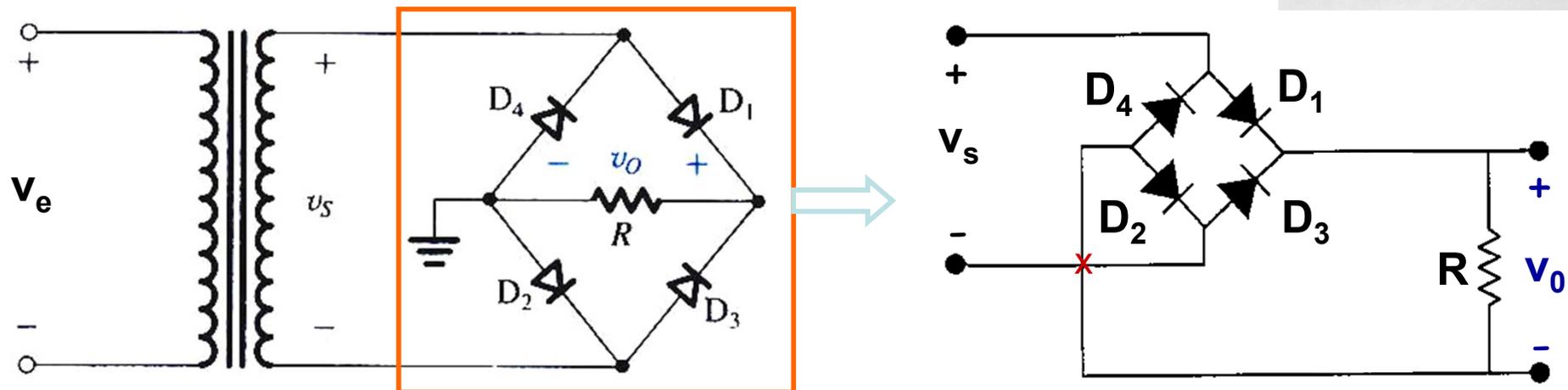
Rectificador de media onda

- Cuando el diodo conduce, el condensador **almacena carga eléctrica**.
- Cuando el diodo se corta (interruptor abierto), el condensador se **descarga poco a poco a través de la resistencia R**.
- En el siguiente ciclo el diodo **vuelve a conducir** y el condensador **recupera la carga** perdida mientras el diodo estaba en corte.
- Si la capacidad del condensador **C**, la resistencia **R** o ambos son de valor elevado, la tensión de salida apenas disminuye en el tiempo.
- Por ello, para reducir el **rizado** de la tensión de salida, en la práctica se utilizan **valores elevados de C**.



Rectificador de onda completa con puente

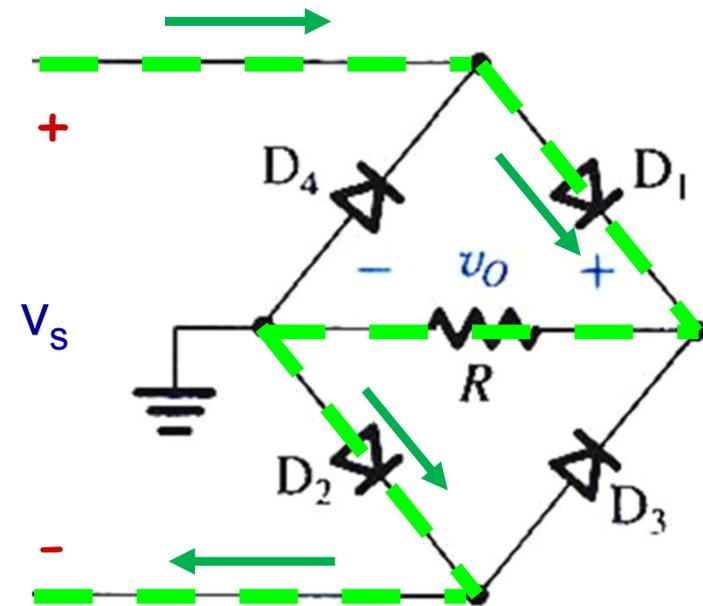
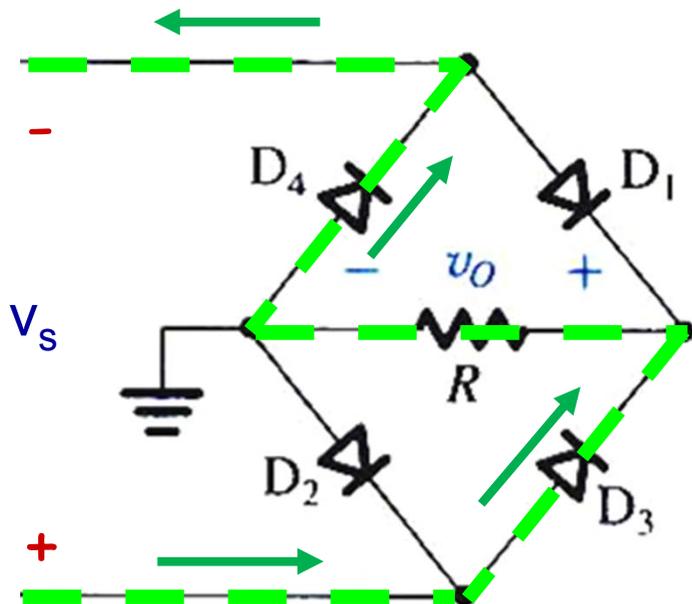
- El **circuito rectificador de media onda** es el más sencillo, pero **no se aprovecha el semiciclo negativo** de la tensión alterna sinusoidal. Para transformar a tensión continua **ambos ciclos de la tensión alterna sinusoidal de entrada**, se utilizan **circuitos rectificadores de onda completa**.
- Uno de los circuitos más utilizados consta de cuatro diodos y se conoce como **PUENTE de diodos**. Disponible comercialmente.



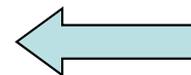
- ✓ En el puente de diodos, siempre hay **DOS diodos que conducen simultáneamente**: en el semiciclo **positivo** de v_s conducen D_1 y D_2 , en el semiciclo **negativo** lo hacen D_3 y D_4

Rectificador de onda completa con puente

- En el **semiciclo positivo de v_s** :
 - La corriente pasa por D_1 , luego por la resistencia R y por último por D_2 .
 - D_3 y D_4 se encuentran en inversa (corte).

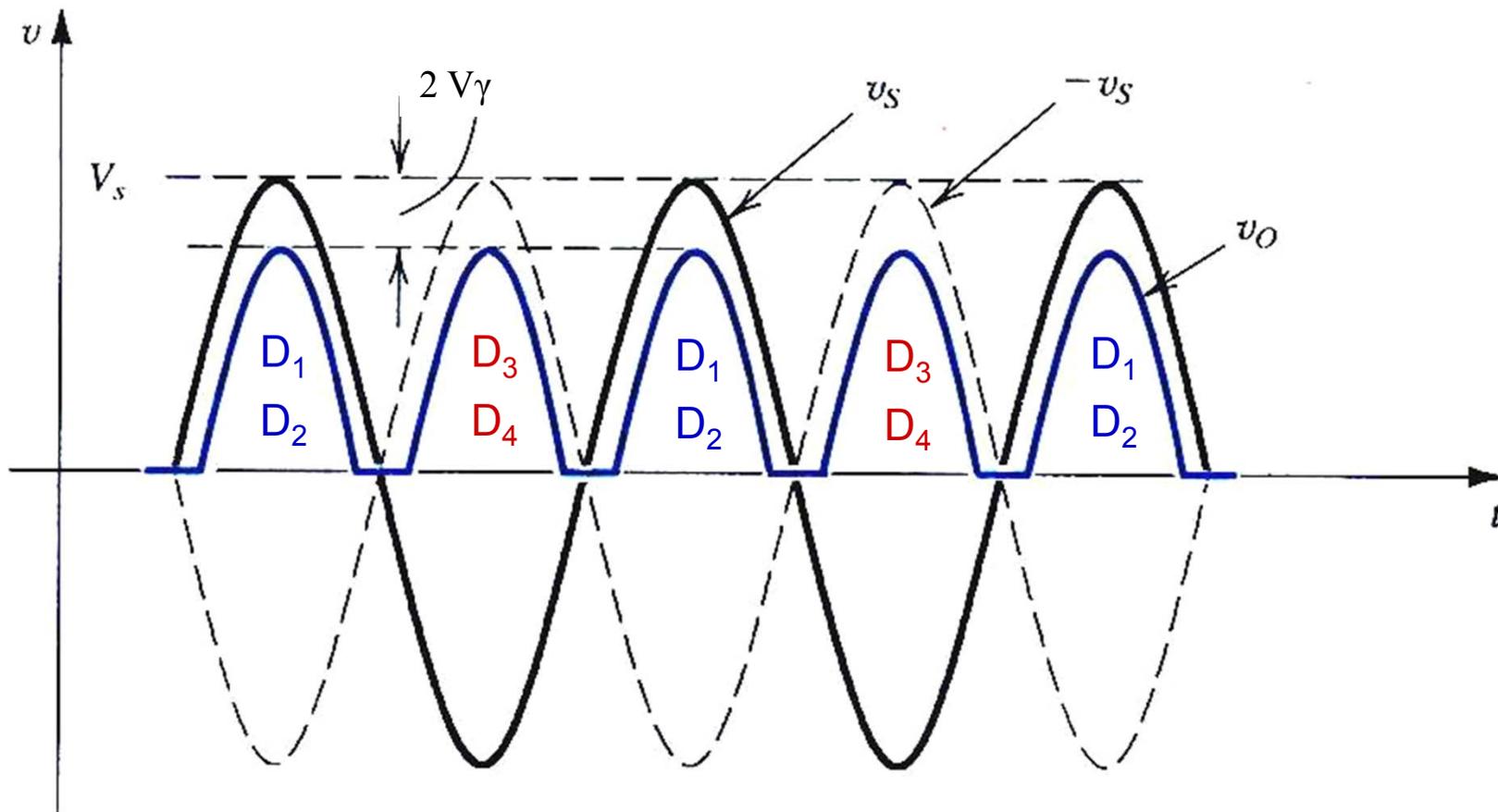


- En el **semiciclo negativo de v_s** :
 - La corriente pasa por D_3 , luego por la resistencia R y por último por D_4 .
 - D_1 y D_2 se encuentran en inversa (corte).



Rectificador de onda completa con puente

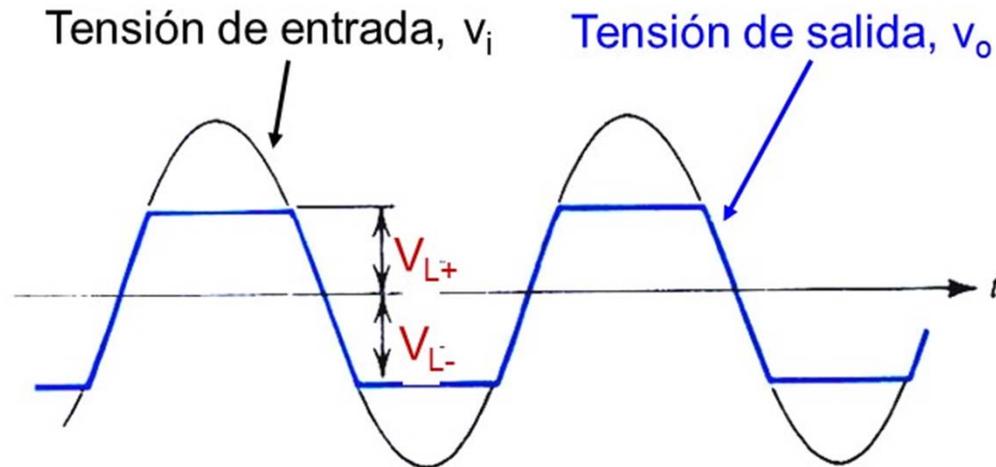
- Dado que siempre hay **dos diodos conduciendo**, la tensión de salida del transformador debe **superar el doble de la tensión de codo** para que exista conducción:



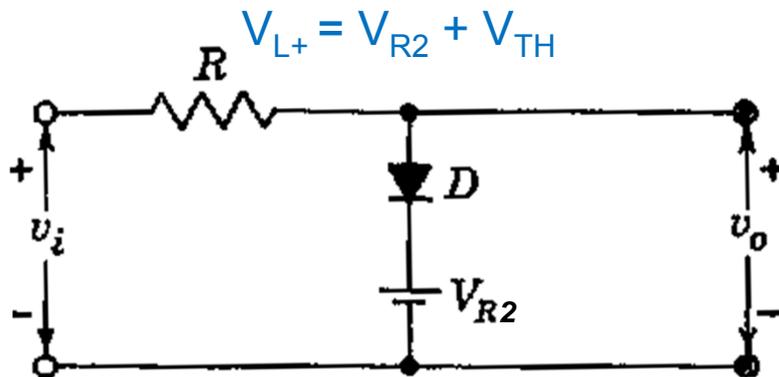
- ✓ Como en los circuitos rectificadores anteriores, un **condensador C conectado en paralelo con la resistencia R** permite **reducir el rizado** de la tensión de salida v_o .

Circuito recortador o limitador

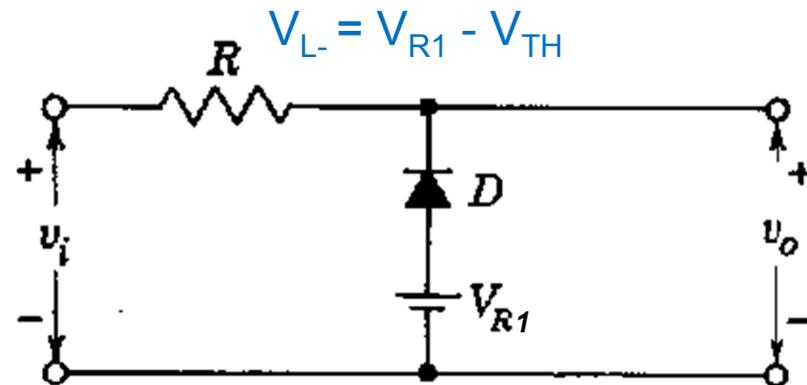
- ✓ Un **circuito recortador** (limitador, o selector) de tensión permite **eliminar** en la tensión de salida v_o una parte de la tensión de entrada v_i que supere un cierto intervalo de voltaje.



Recortador a un nivel superior



Recortador a un nivel inferior



- Si se combinan los dos anteriores en el mismo y se cumple que $V_{R2} > V_{R1} - 2 \cdot V_{TH}$ se obtiene un **recortador a dos niveles** (superior V_{L+} e inferior V_{L-})

- **Electronics.** A System Approach. Neil Storey. Pearson-Prentice Hall. 4^a edición (en inglés)
- **Diseño Electrónico. Circuitos y Sistemas.** Savant, Roden, Carpenter. Addison-Wesley-Longman.
- **Microelectrónica.** Jacob Millman, Arvin Grabel. McGraw Hill.
- **The Art of Electronics.** Paul Horowitz. Cambridge University Press.