

# Tema 5. Diodo y rectificación

# Índice

La unión p-n. El diodo de unión

Principio básico de operación. Característica I-V

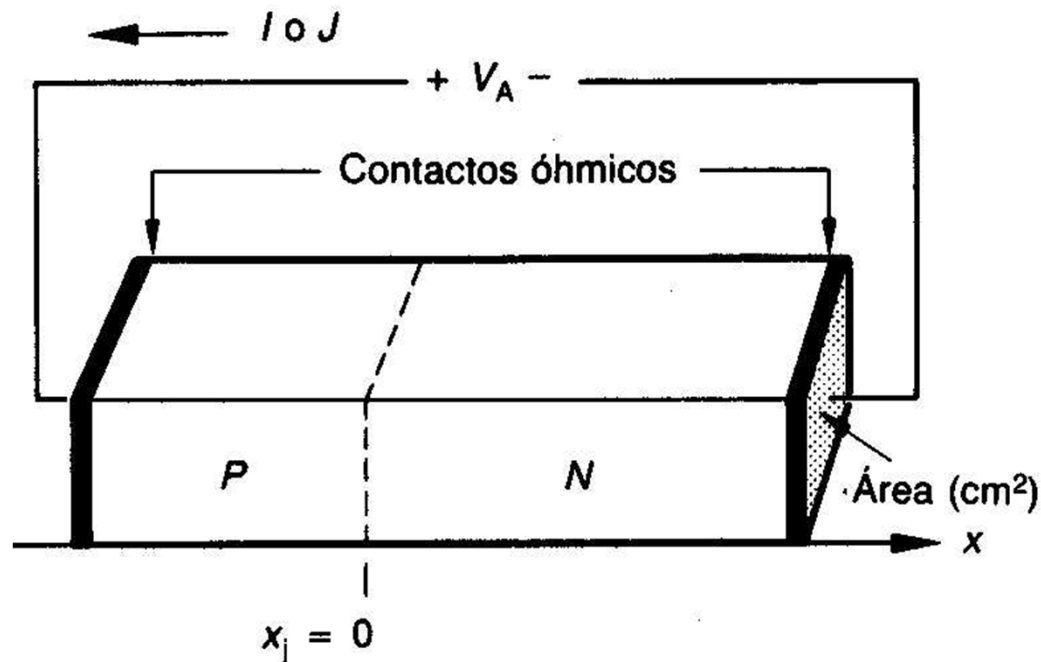
Modelos circuitales del diodo

El diodo Zener. Otros tipos de diodos

Circuitos básicos con diodos. Rectificación.

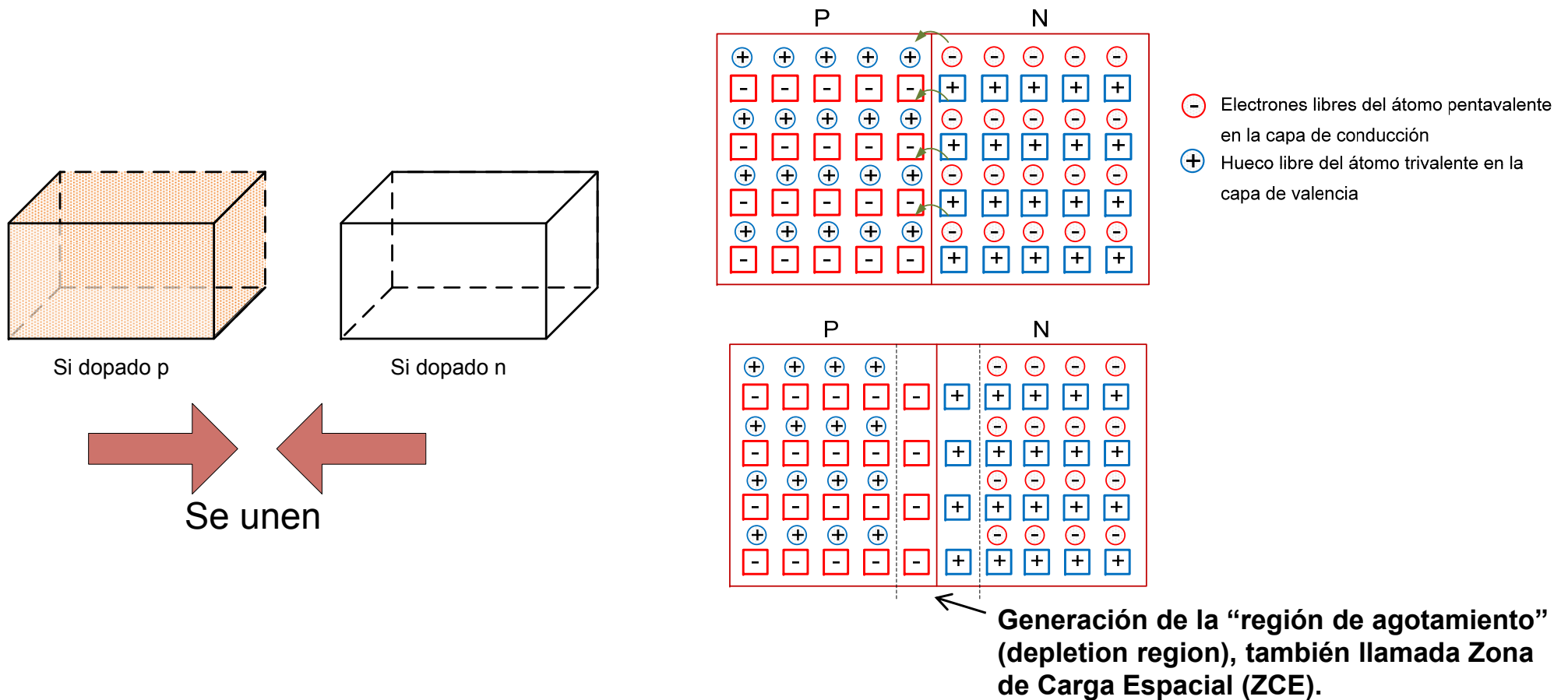
## El Diodo de Unión

- ✓ 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**.



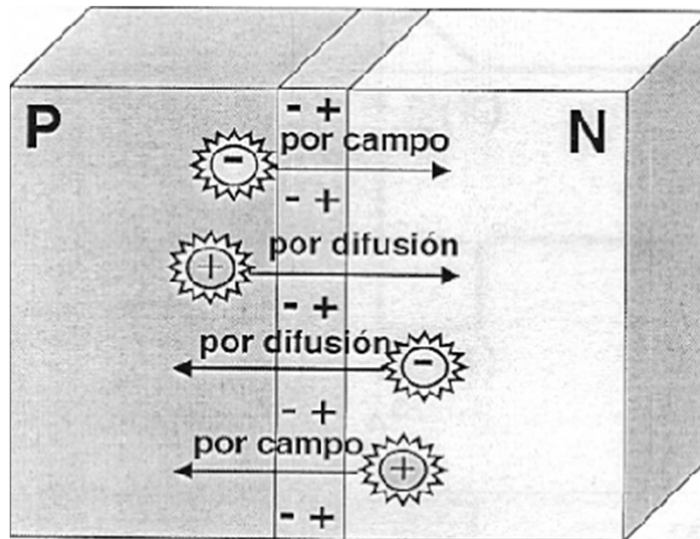
- $V_A$  o  $V_D$ : tensión aplicada al diodo (V)
- $I_D$ : corriente del diodo (A)
- $J_D$ : densidad de corriente,  $I/\text{Área}$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
- $x_j$ : posición de la unión (m)

- 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.

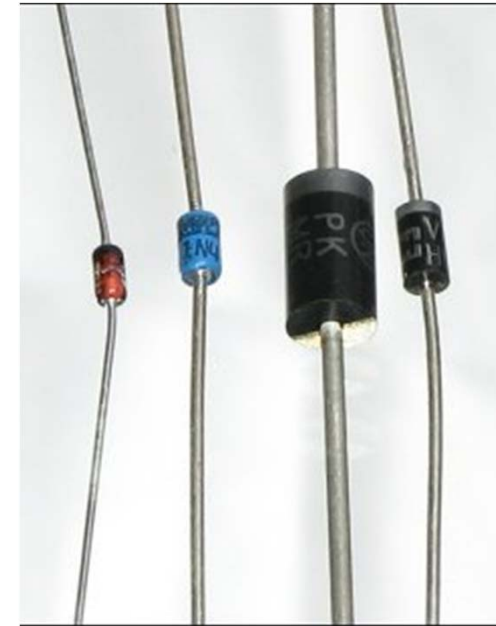
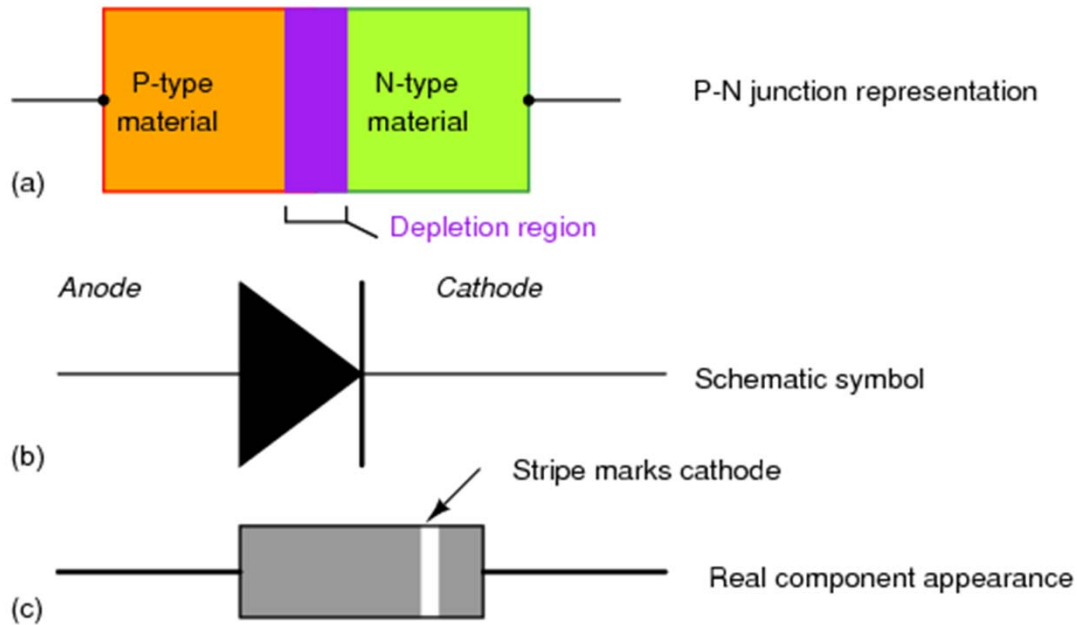


**Campo Eléctrico**

**¿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.

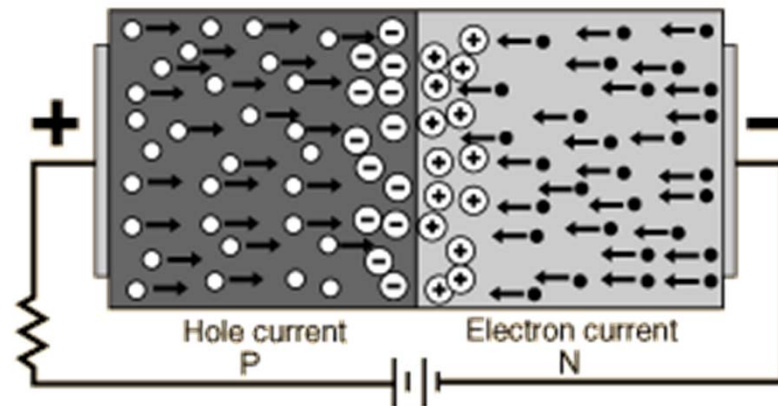
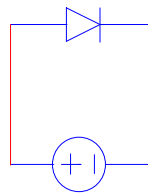
# Símbolo circuital del diodo. Encapsulados



# 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:

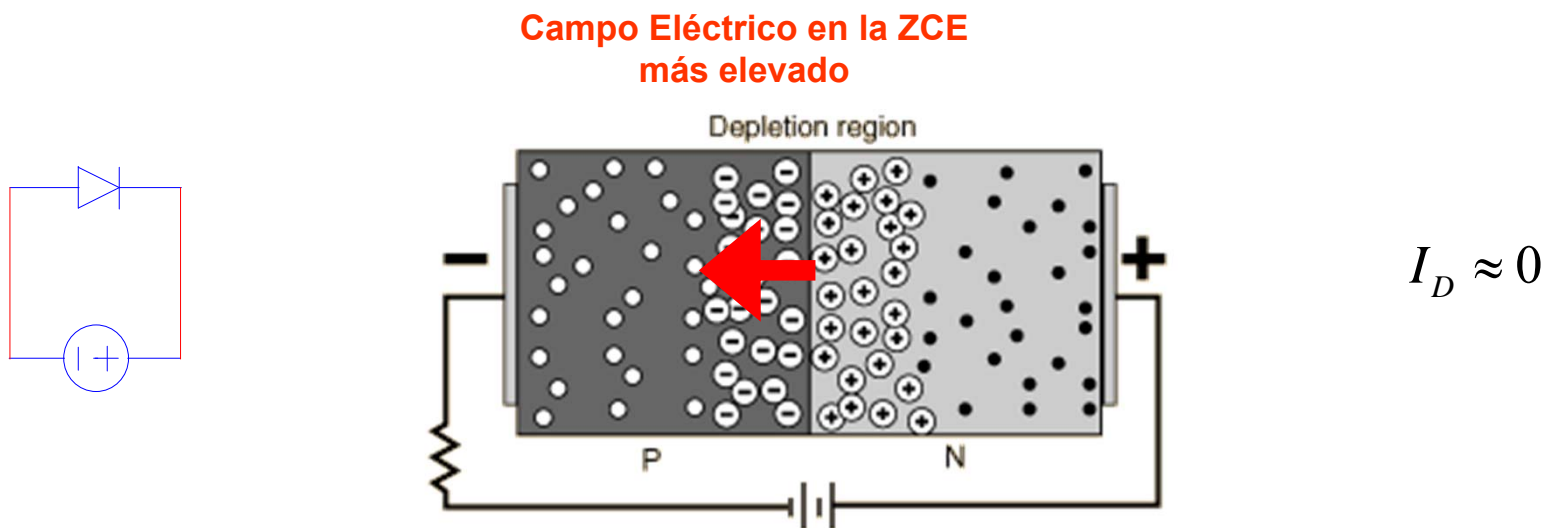
a) **POLARIZACIÓN DIRECTA:** Cuando apliquemos una tensión  $V_D$  **positiva** (zona P a más tensión que la zona N) disminuye el campo eléctrico en la ZCE y se rompe el equilibrio. Se favorece **la difusión de portadores** (huecos de la zona P hacia la zona N y electrones de la zona N hacia la zona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

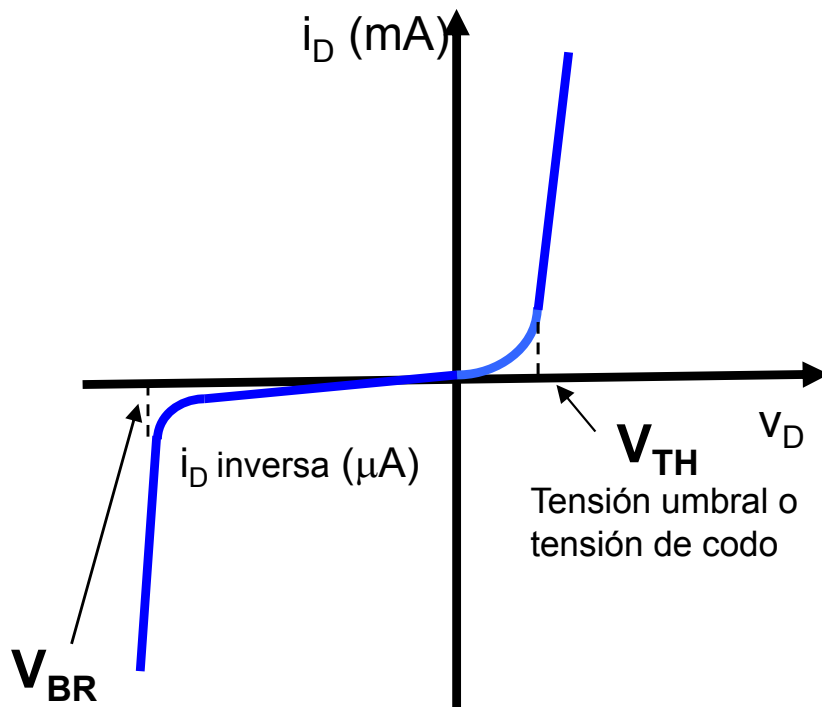
Ahora se favorece el arrastre de huecos de la zona N hacia la zona P y de electrones de la zona P a la N. Como hay muy pocos, la corriente que circula por el diodo (de N hacia P) es ahora muy pequeña y casi independiente de la tensión.





# Característica I-V de la unión PN

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



Tensión de ruptura

$V_D$  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.

$\eta$  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  $300$ K: K cte de Boltzmann, T temperatura, q carga del electrón)

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

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

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

## Modelos circuitales del diodo

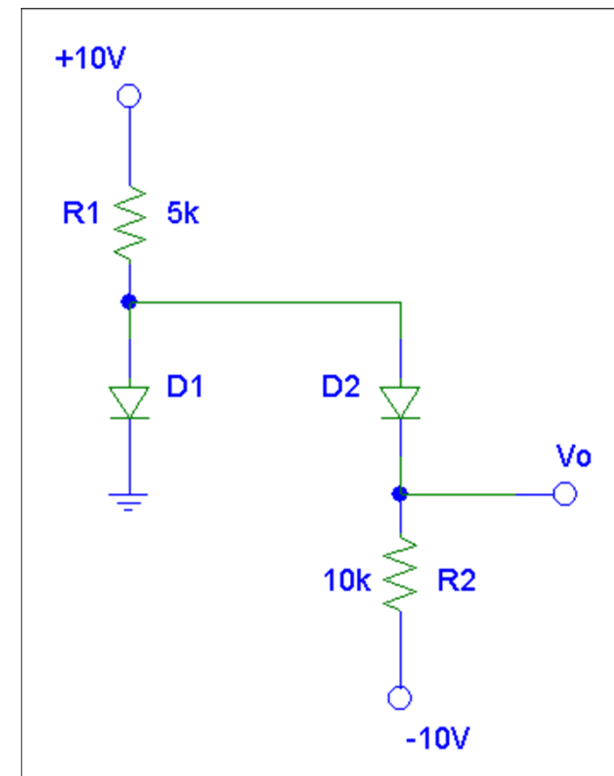
- Cuando se construyen circuitos complejos con diodos, **el cálculo de las tensiones y corrientes en el circuito utilizando la característica I-V del diodo anterior** sólo se puede realizar de manera **numérica** (simulación mediante computador, herramientas de resolución de sistemas de ecuaciones no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

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

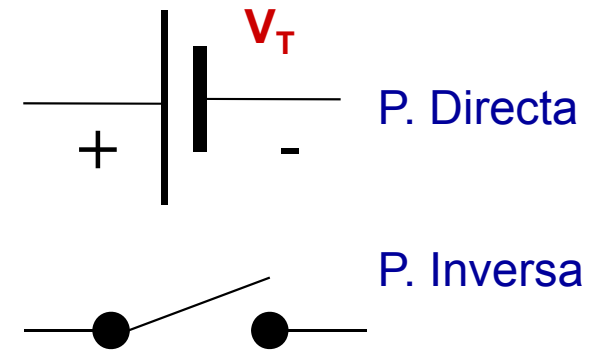
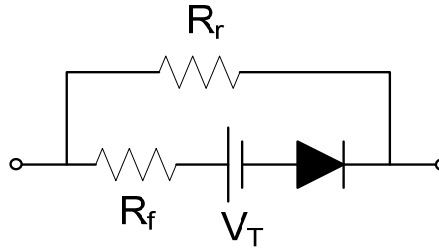
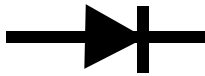


$$V_D = \eta V_T \ln \left( \frac{i_D}{I_S} + 1 \right)$$

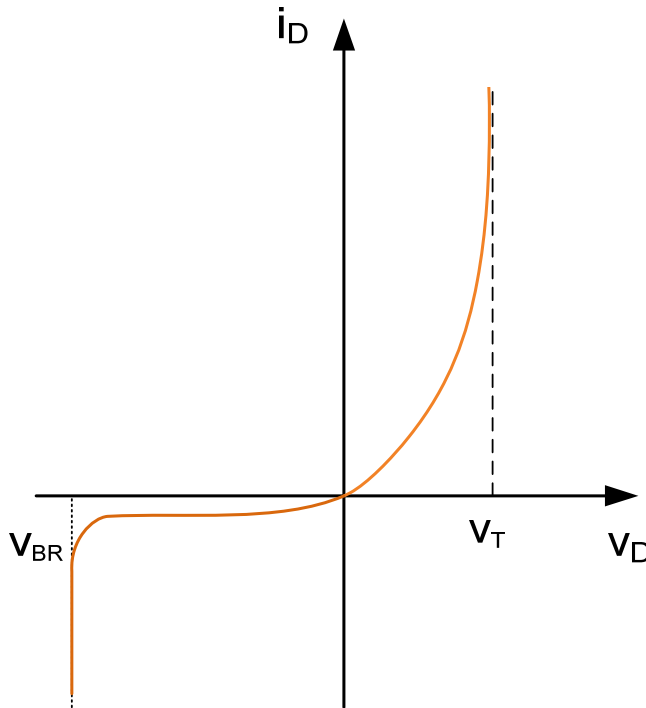
- Por ello, se recurre a **modelos simplificados (llamados modelos circuitales)** del diodo que permitan el análisis y resolución de circuitos de una manera aproximada.



# Modelos circuitales del diodo

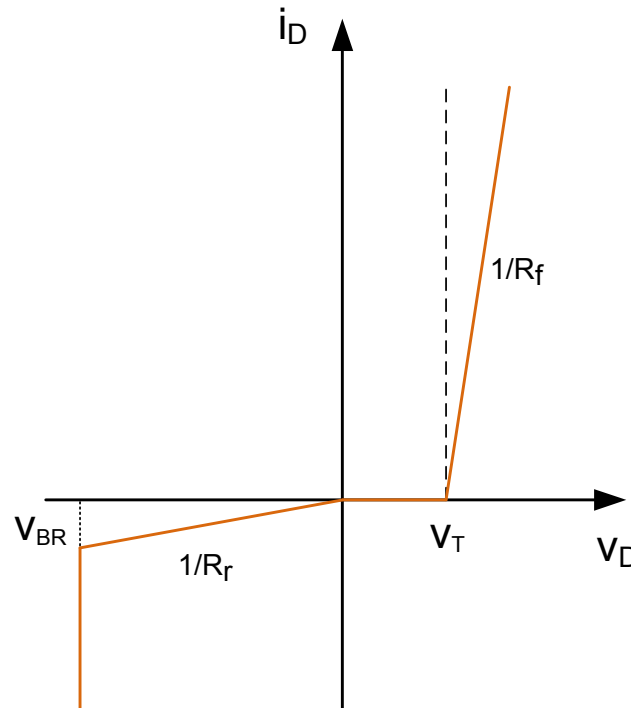


**Curva I-V real**



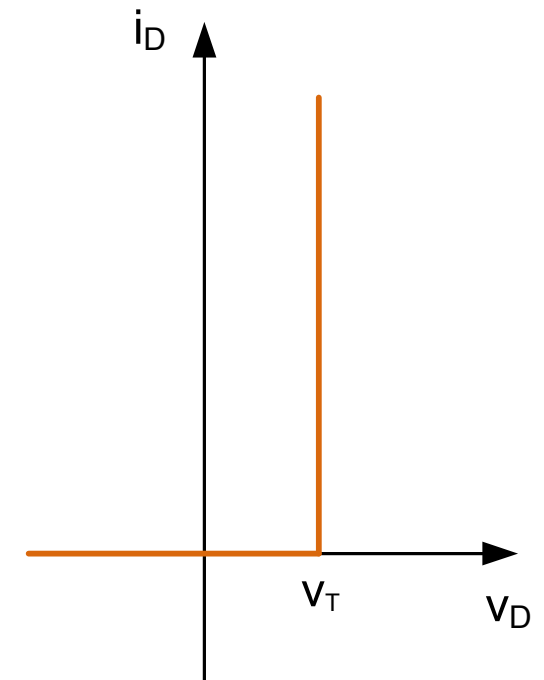
**Modelo lineal**

Curva V-I aproximada



**Modelo de tensión umbral (o de codo).**

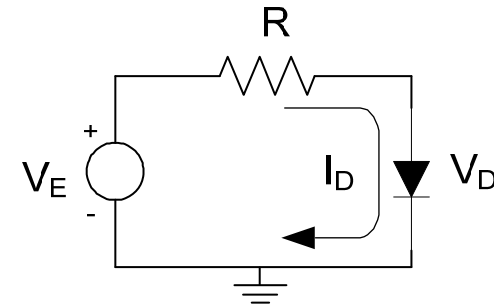
Curva I-V ideal



## 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:

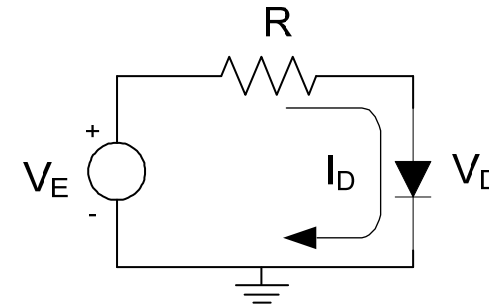
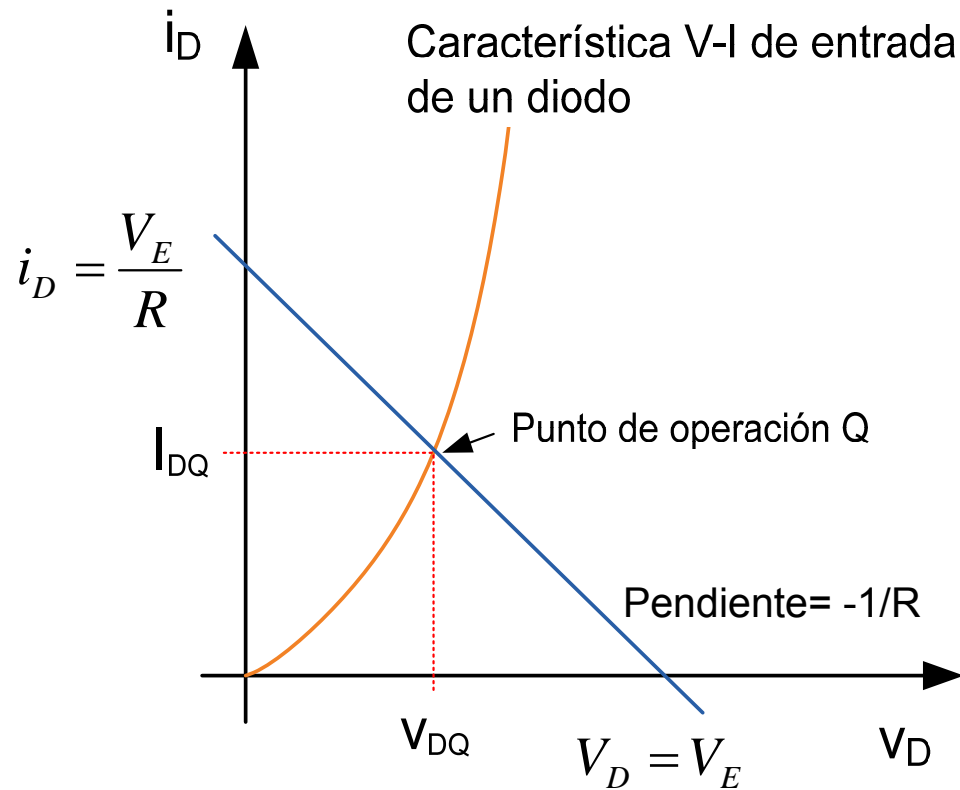
$$V_E = V_R + V_D = I_D \cdot R + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_E - V_D}{R}$$

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<sub>DQ</sub>, I<sub>DQ</sub>):** es la intersección de la recta de carga con la curva característica del componente



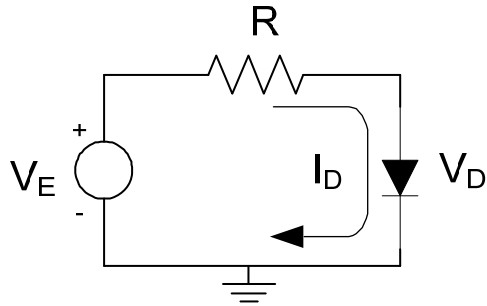
$$V_E = i_D \cdot R + V_D \quad \Rightarrow \quad \frac{V_E - V_D}{R} = I_D;$$

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

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

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

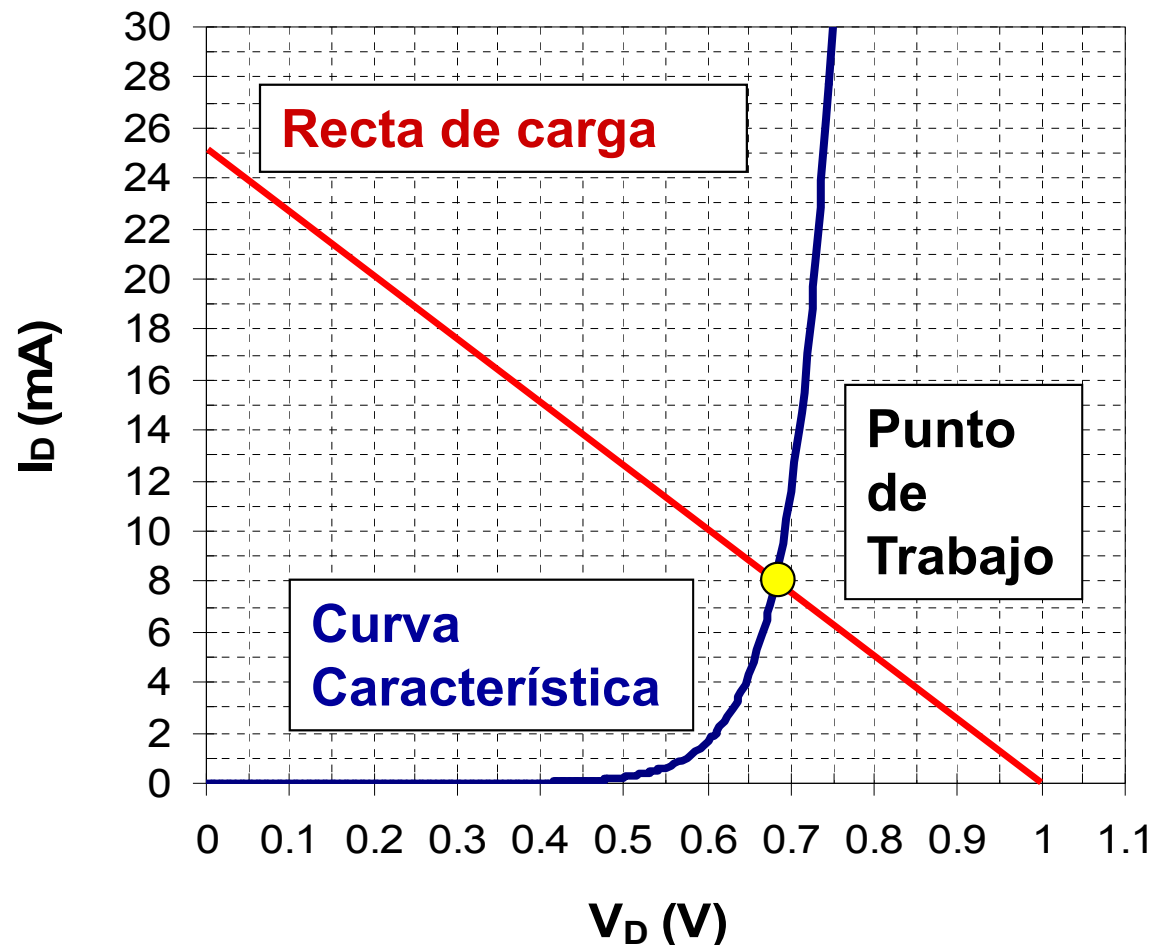
## Ejemplo. Cálculo del punto de trabajo



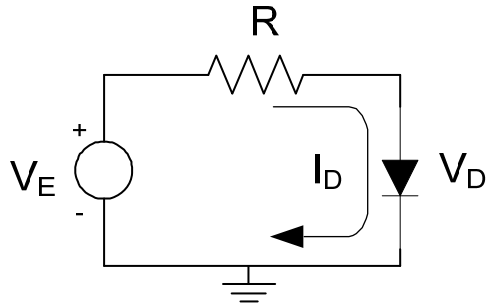
### a) Utilizando la curva característica:

- 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  $8\text{mA} \cdot 40\Omega = 0.32 \text{ V}$ .

- $V_E = 1 \text{ V}, R = 40 \Omega$
- $D = 1N4002$  de Fairchild, cuya curva característica aparece en la figura.



## Ejemplo. Cálculo del punto de trabajo

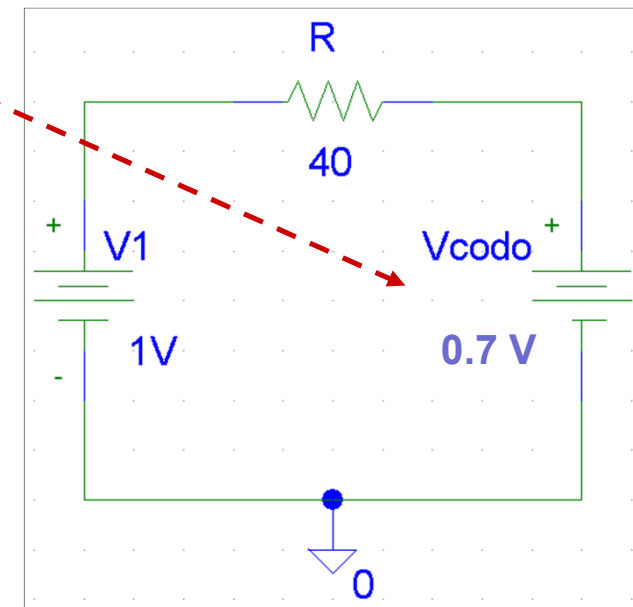


- $V_E = 1 \text{ V}$ ,  $R = 40 \Omega$
- $D = 1\text{N}4002$  de Fairchild, cuya tensión de codo es de aprox.  $0.7 \text{ V}$  (diodo de Si).

### 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



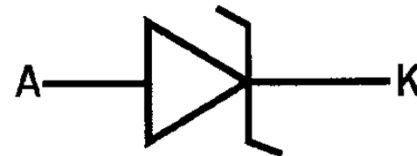
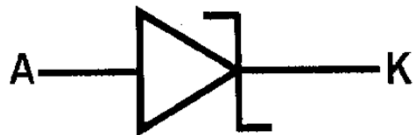
## ¿Cómo analizar el estado de los diodos en un circuito?

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.



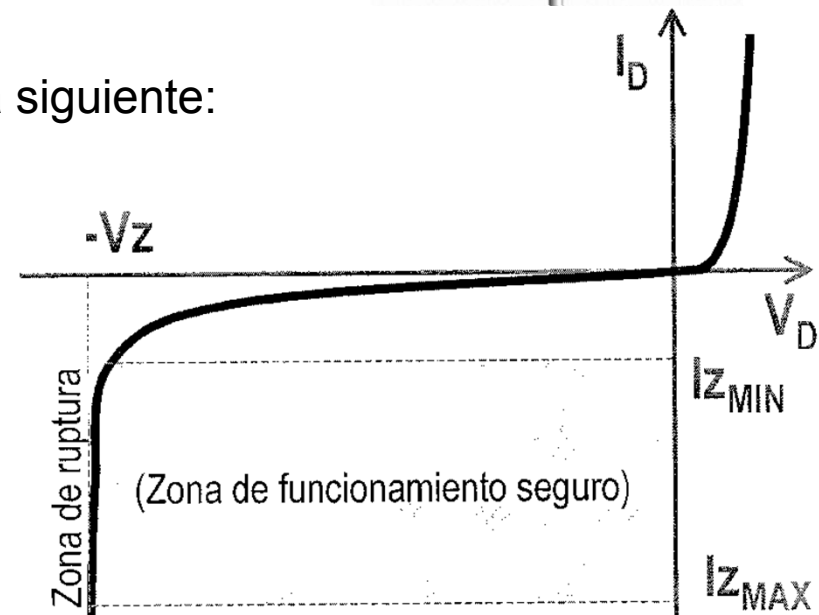
## Otros diodos: el diodo Zener

- 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:



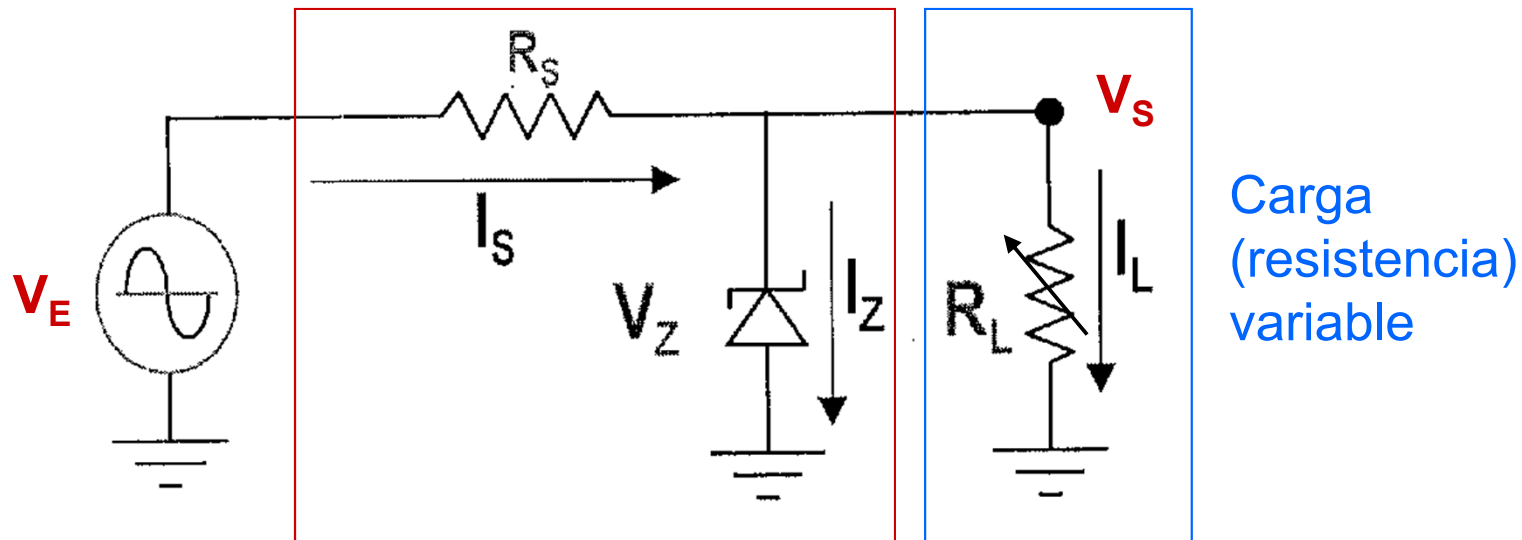
- ✓ La curva característica del diodo Zener es la siguiente:

- $V_Z$  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

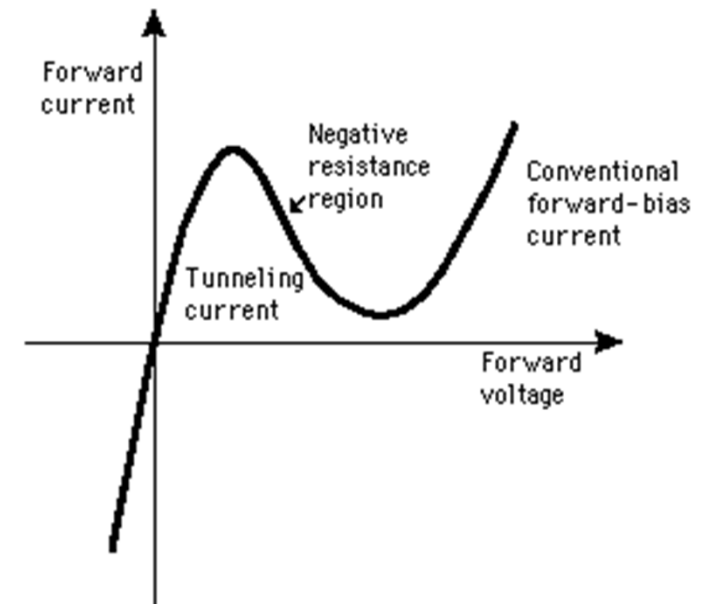
- Si en el circuito anterior se hace circular por el diodo Zener una corriente en inversa entre  $I_{Z_{MIN}}$  e  $I_{Z_{MAX}}$ , la tensión de salida  $V_S$  será fija y de valor  $V_Z$ . De esta manera, aunque varíe el valor de la resistencia  $R_L$ , ésta siempre estará sometida a la misma tensión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

## 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.

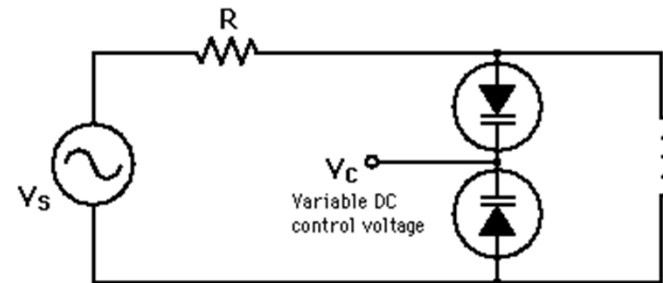


**Diodo Túnel:** Diodos de **muy alto dopado** en los que se produce el efecto túnel (cuántico), presentado una resistencia negativa en una zona de funcionamiento. Útil en osciladores de alta frecuencia y para conectar células solares en tándem.

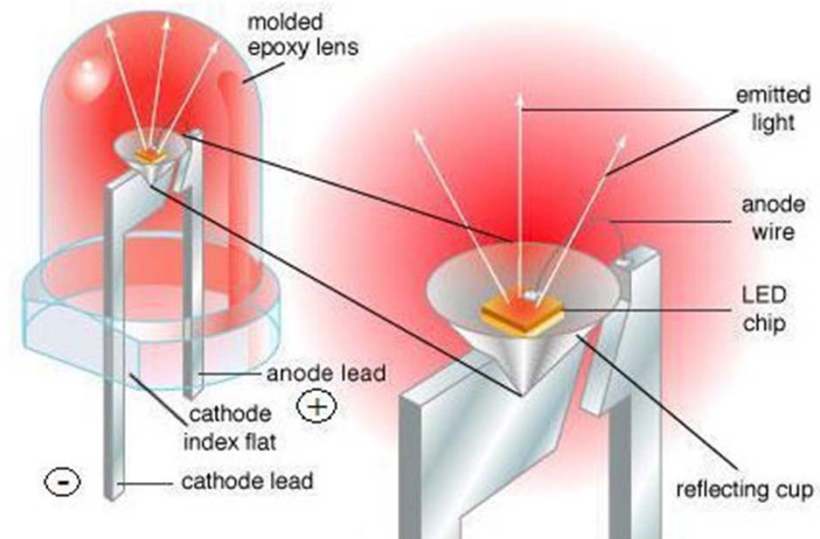
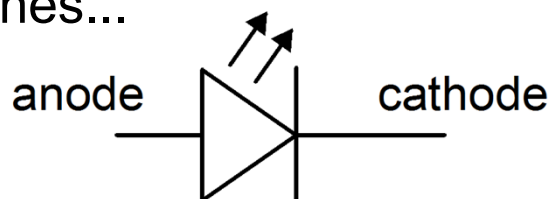


## Otros diodos

**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.

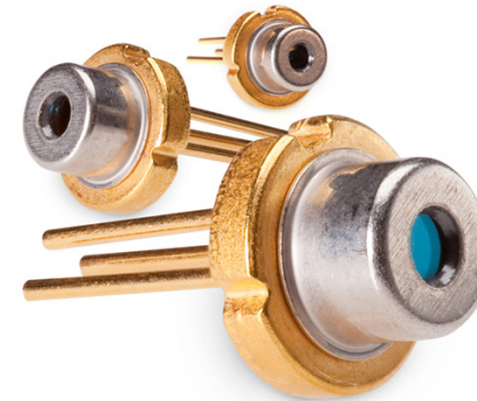
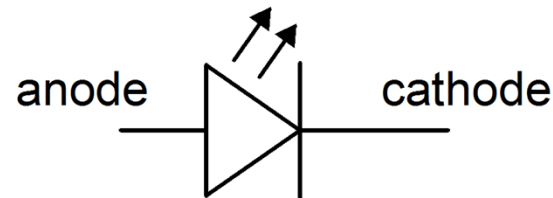


**Diodo LED (*Light Emitting Diode*):** diodo que **emiten luz** al paso de la corriente. Existen LED de distintas longitudes de onda (**desde el infrarrojo al ultravioleta**) en función del semiconductor en el que esté fabricado. Usados en indicadores, pantallas, comunicaciones...

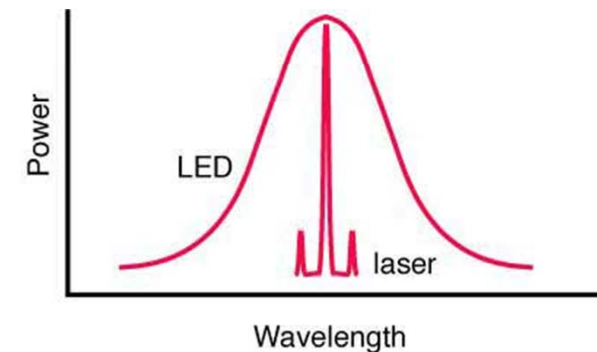
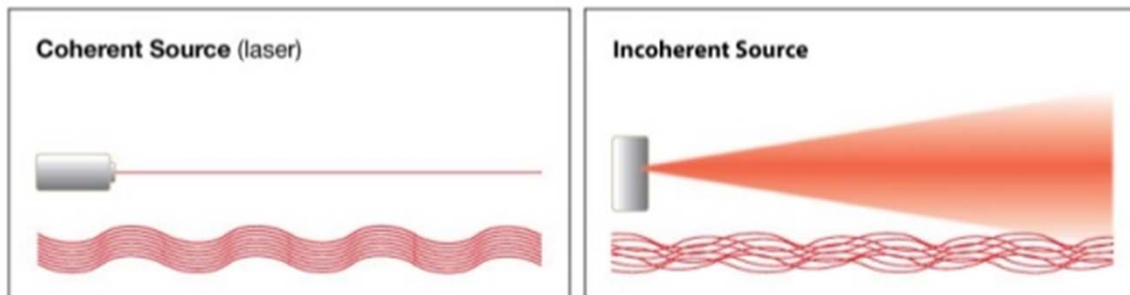


## Otros diodos

**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.

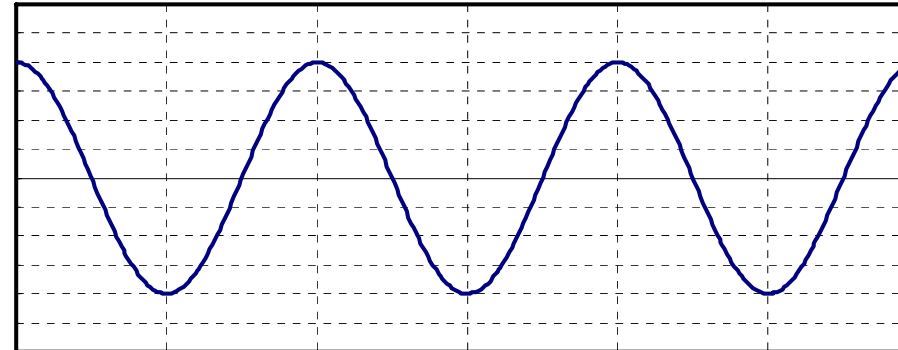
Los **fototransistores** además **amplifican esa corriente**, ganando sensibilidad.

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



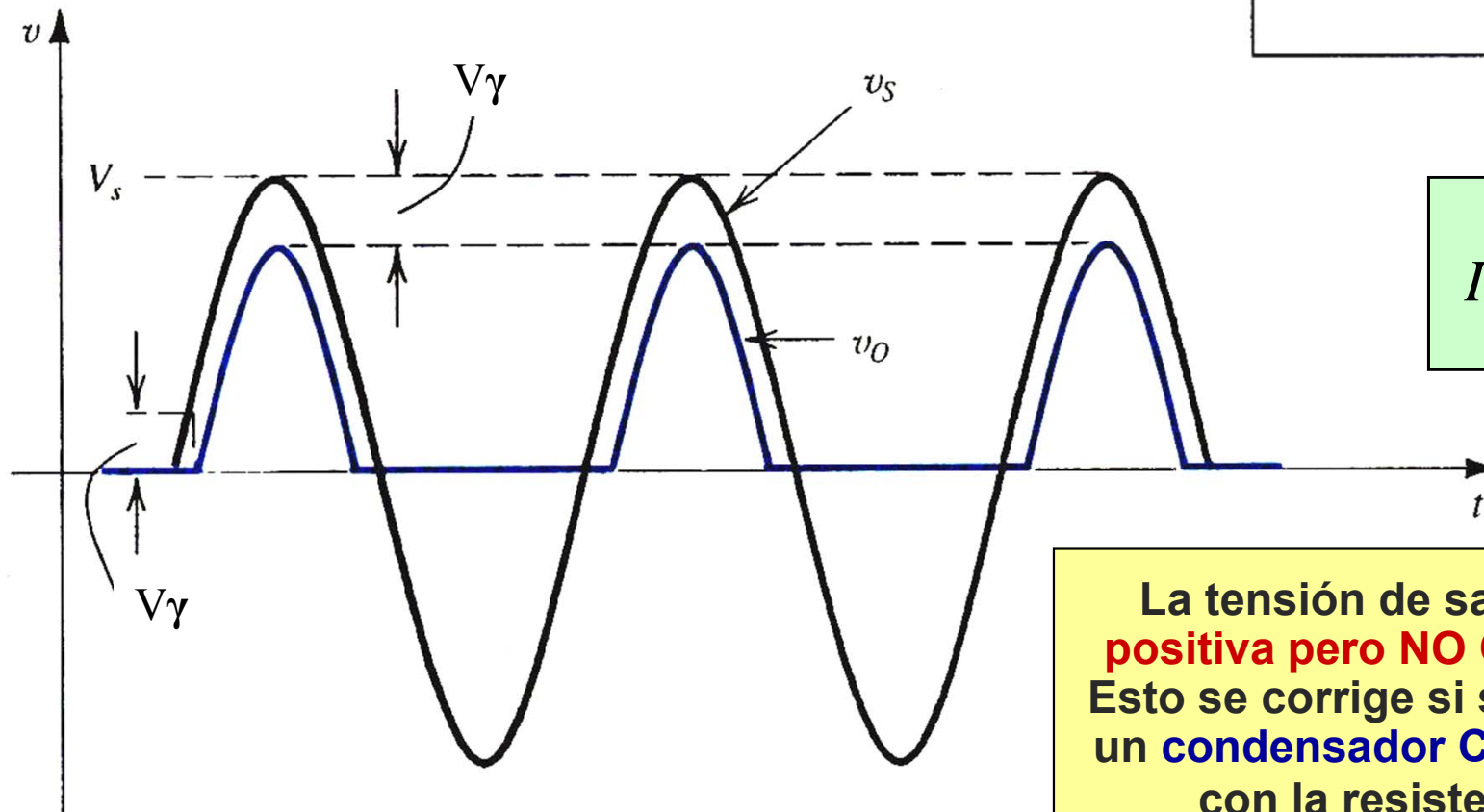
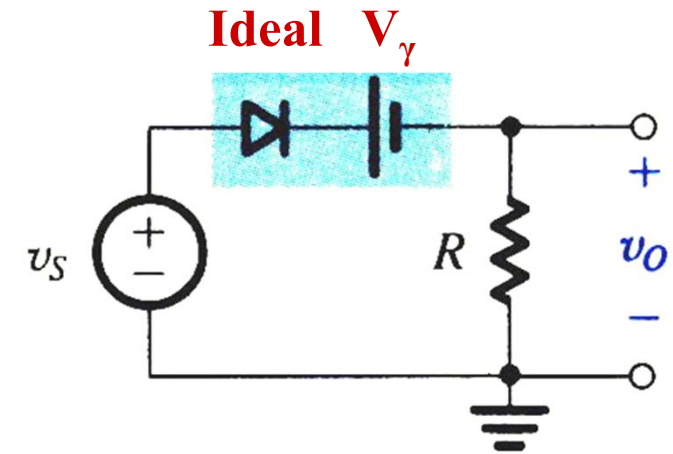
# Circuitos con diodos: Rectificadores

- 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  $v_s < V_\gamma$ ):



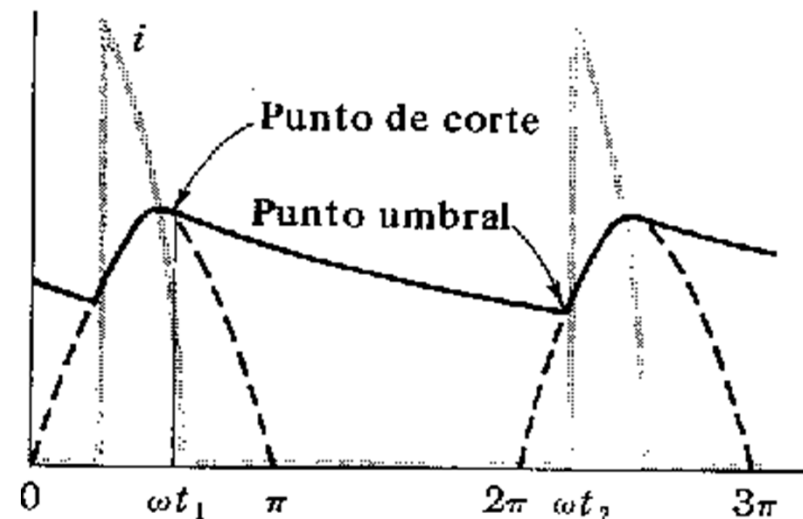
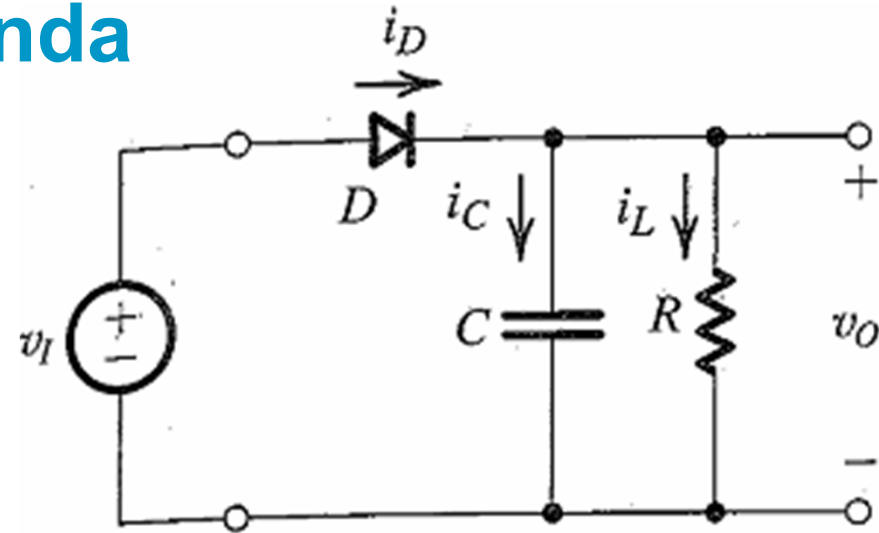
$$I = \frac{v_s - V_\gamma}{R}$$

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.



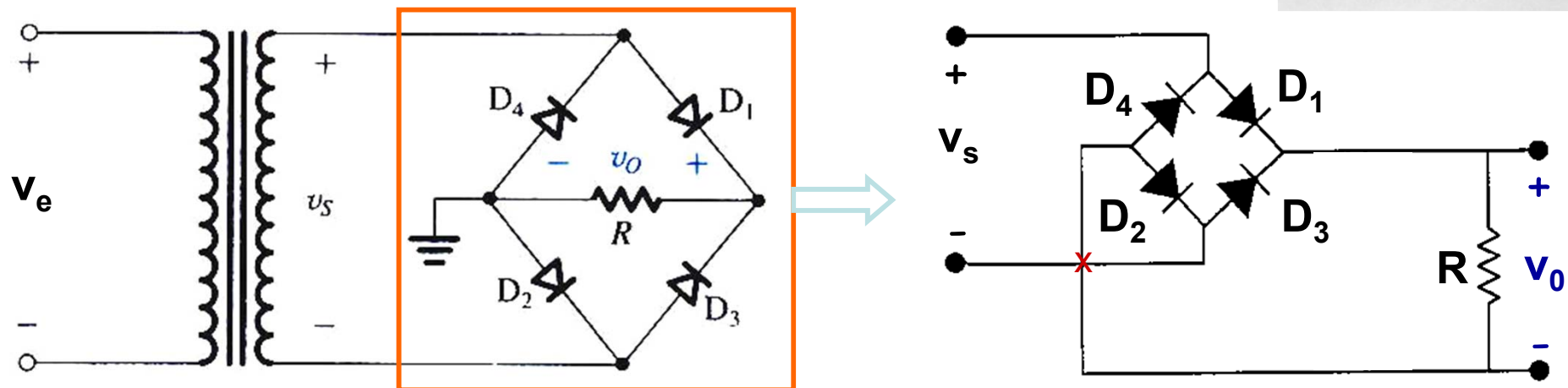
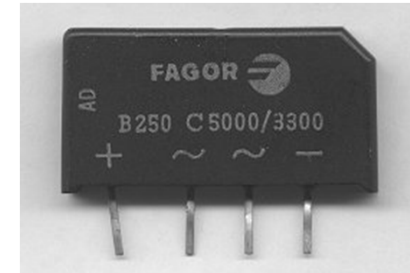
## Rectificador de media onda

- 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

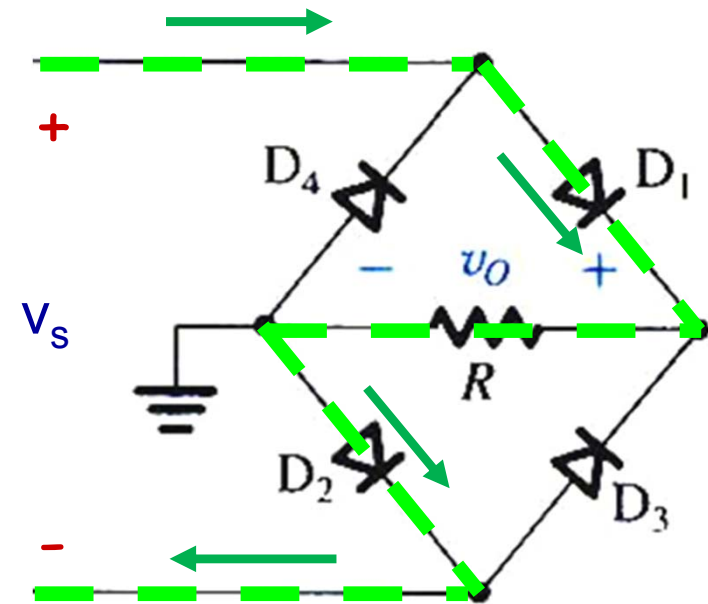
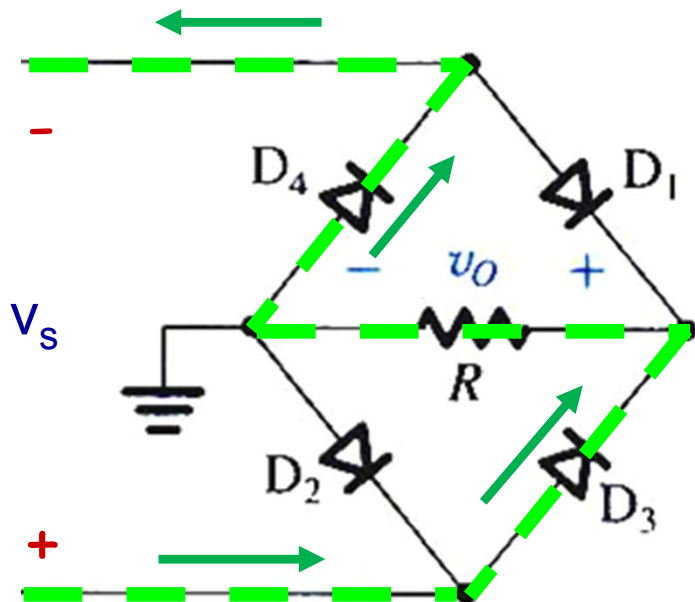
- El **circuito rectificador de media onda** es el más sencillo, pero **no se aprovecha el semiciclo negativo** de la tensión alterna sinusoidal. Para transformar a tensión continua **ambos ciclos de la tensión alterna sinusoidal de entrada**, se utilizan **circuitos rectificadores de onda completa**.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



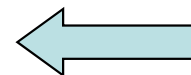
- ✓ En el puente de diodos, siempre hay **DOS diodos que conducen simultáneamente**: en el semiciclo **positivo** de  $v_s$  conducen  $D_1$  y  $D_2$ , en el semiciclo **negativo** lo hacen  $D_3$  y  $D_4$

# 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).

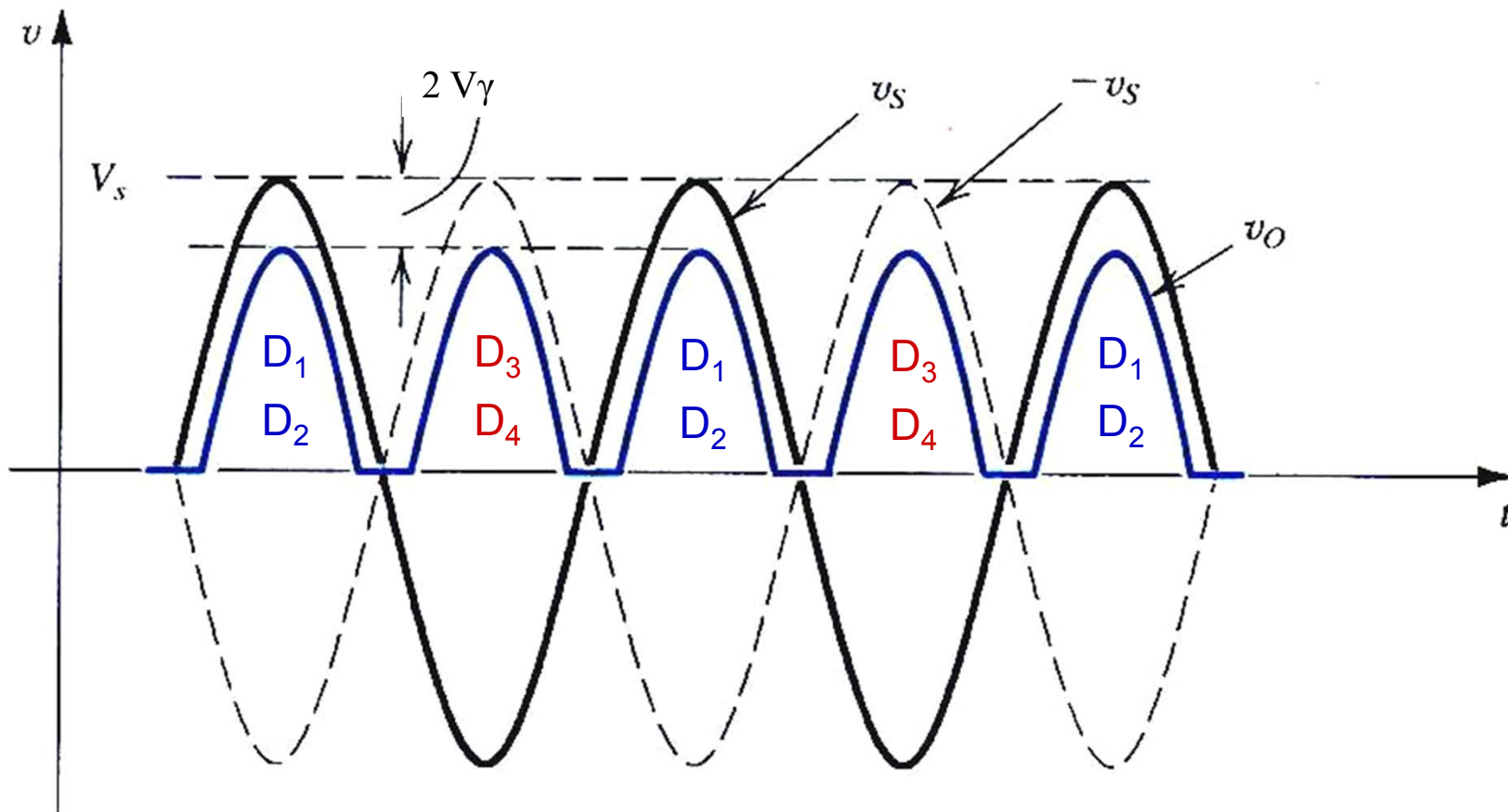


- En el **semiciclo negativo de  $v_s$** :
  - La corriente pasa por  $D_3$ , luego por la resistencia  $R$  y por último por  $D_4$ .
  - $D_1$  y  $D_2$  se encuentran en inversa (corte).



## Rectificador de onda completa con puente

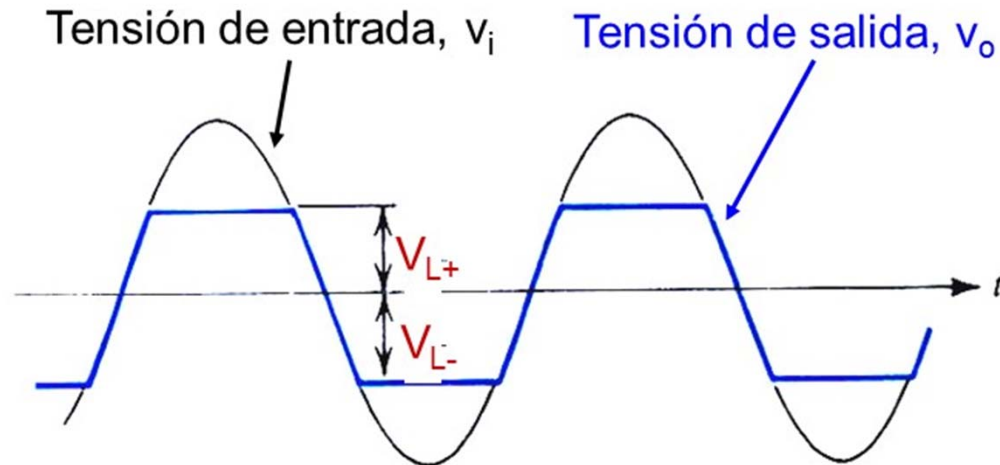
- Dado que siempre hay **dos diodos conduciendo**, la tensión de salida del transformador debe **superar el doble de la tensión de codo** para que exista conducción:



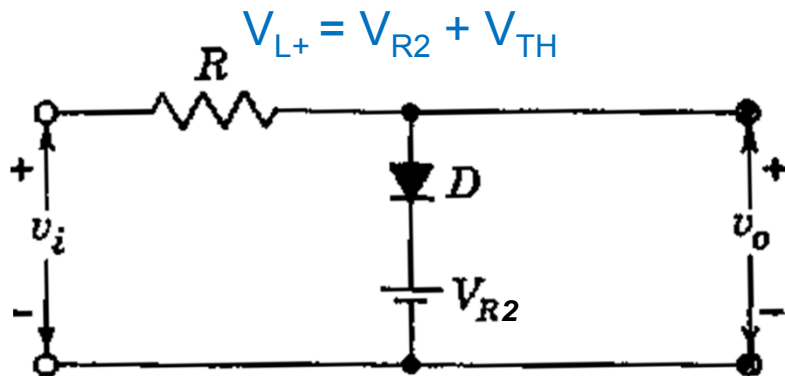
- ✓ Como en los circuitos rectificadores anteriores, un **condensador C conectado en paralelo con la resistencia R** permite **reducir el rizado** de la tensión de salida  $v_o$ .

# Circuito recortador o limitador

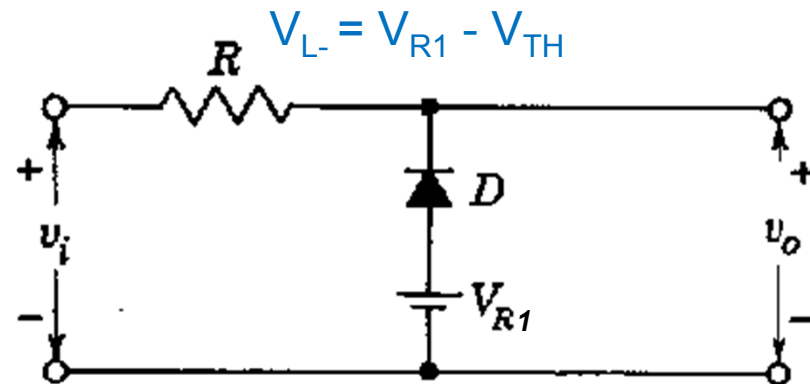
- ✓ Un **circuito recortador** (limitador, o selector) de tensión permite **eliminar** en la tensión de salida  $v_o$  una parte de la tensión de entrada  $v_i$  que supere un cierto intervalo de voltaje.



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<sup>a</sup> 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.