

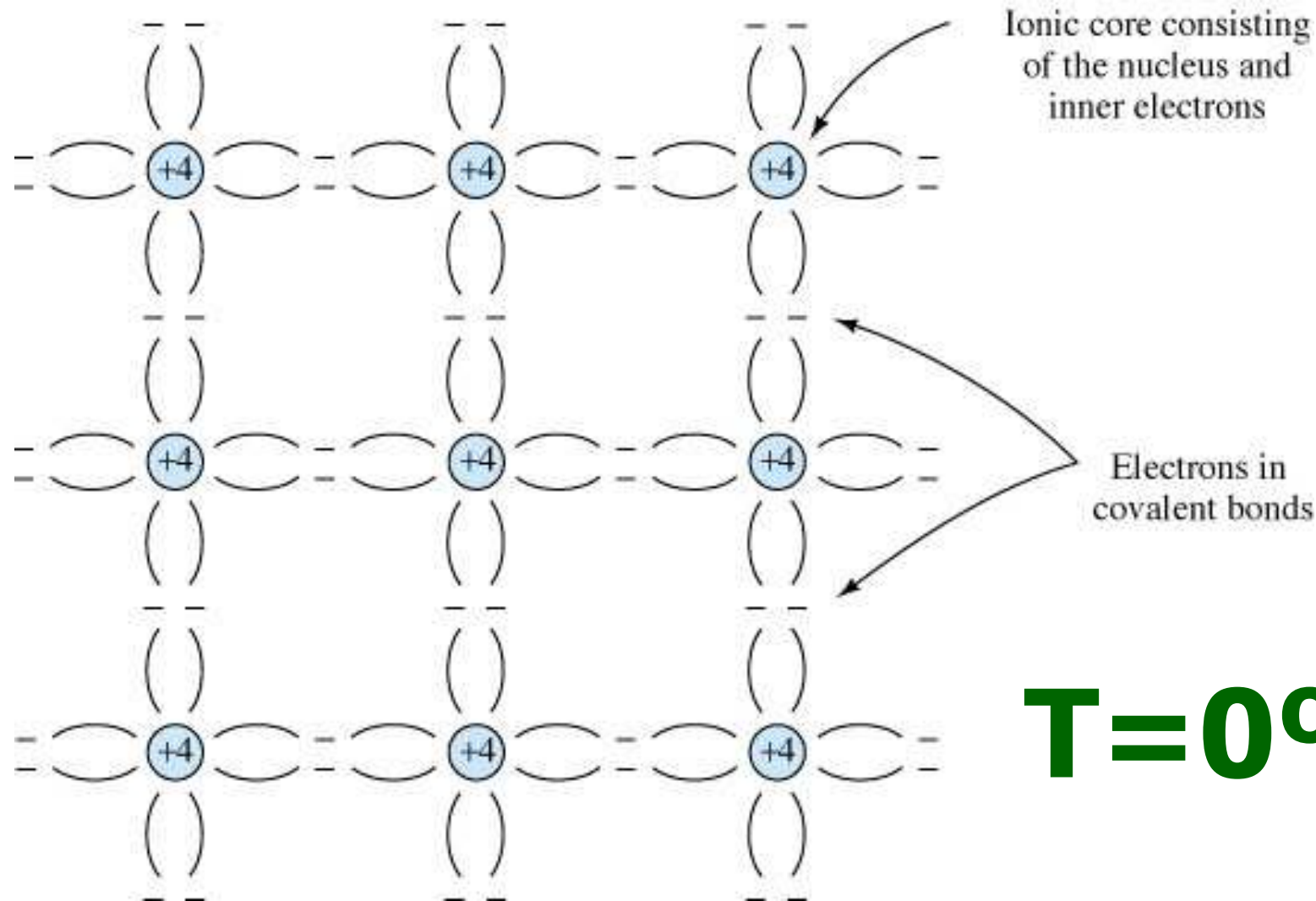
Tema 4. Dispositivos Electrónicos

4.1.- Conceptos básicos de semiconductores. Unión PN

4.2.- El Diodo

4.3.- El Transistor MOSFET

Estructura del Si enlaces covalentes

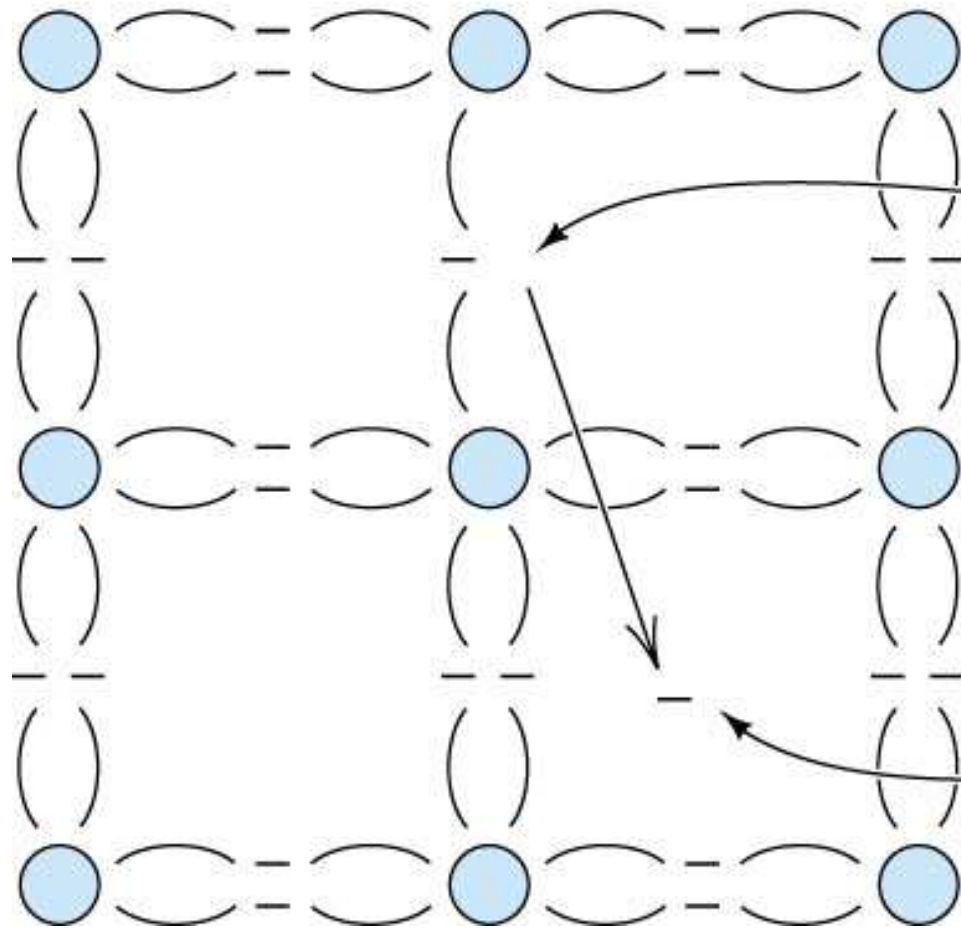


A temperatura ambiente

$$n = p$$

n: concentración de electrones

p: concentración de huecos



Broken bond

Hueco

T=300°K

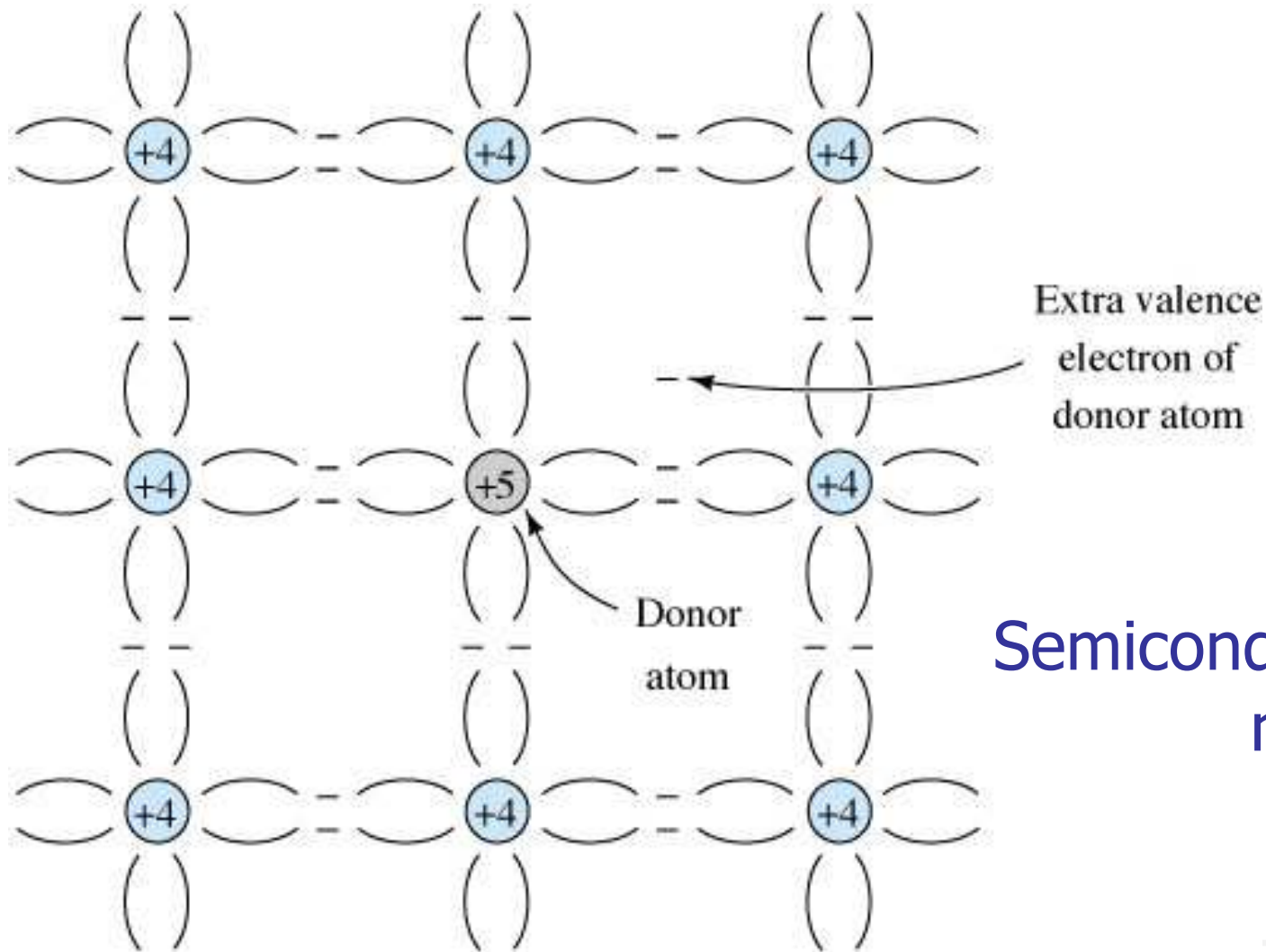
Free electron

Electrón

Si dopado con impurezas donadoras

N_D : concentración de impurezas donadoras

P: Fosforo
As: Arsenico
Sb: Antimonio



Semiconductor tipo N
 $n > p$

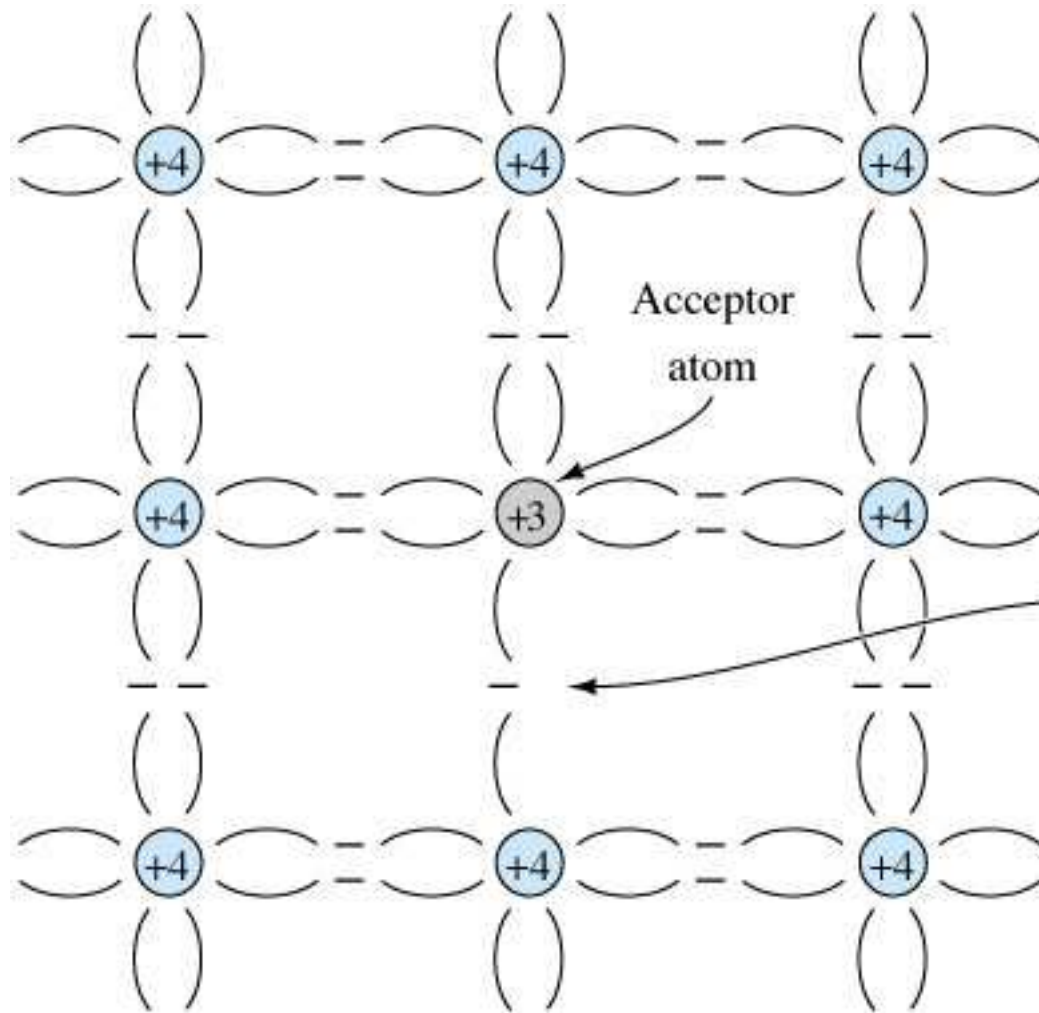
Si dopado con impurezas aceptadoras

N_A : concentración de impurezas donadoras

B: Boro

Al: Aluminio

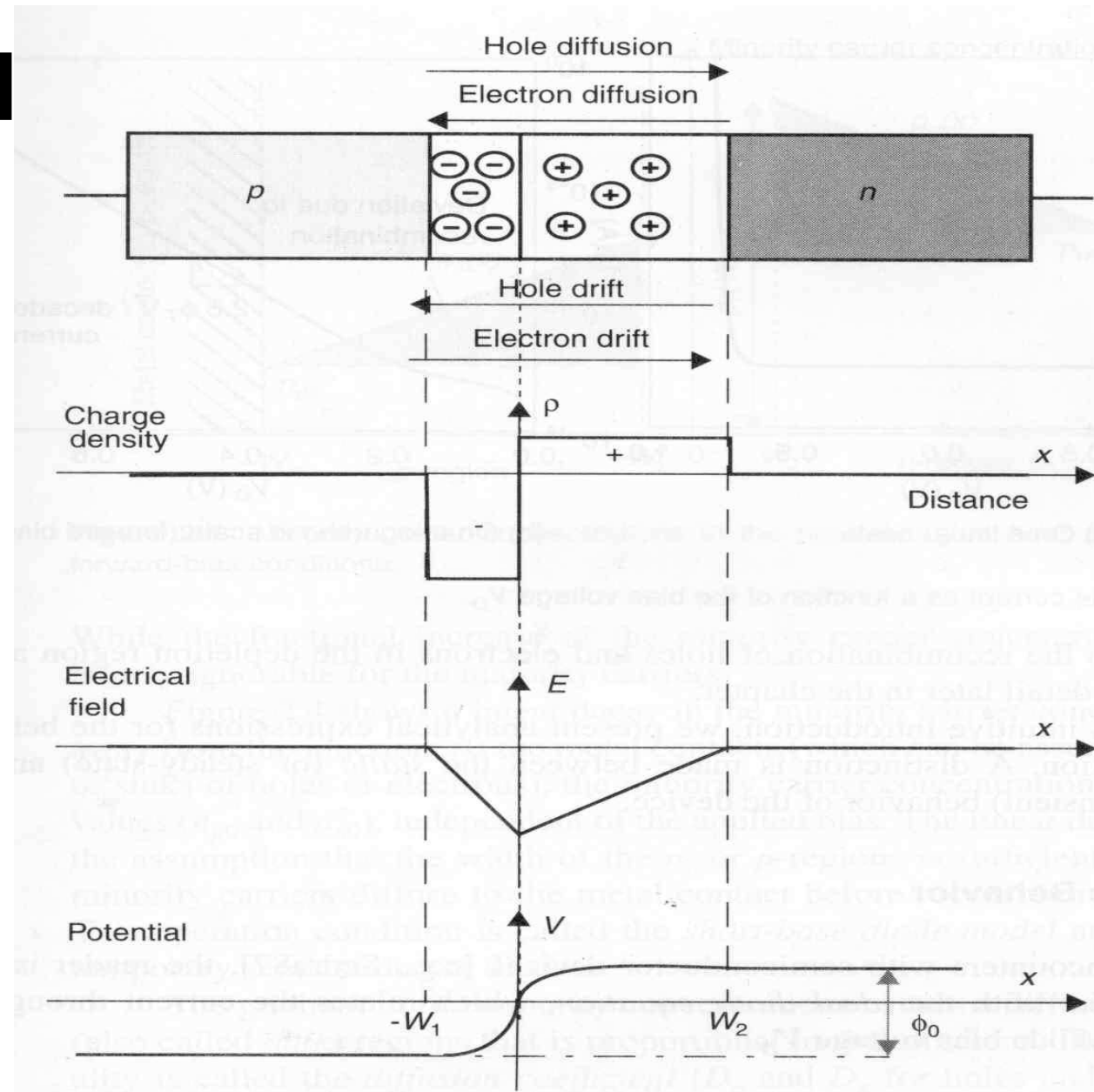
Ga: Galio



Semiconductor tipo P

$n < p$

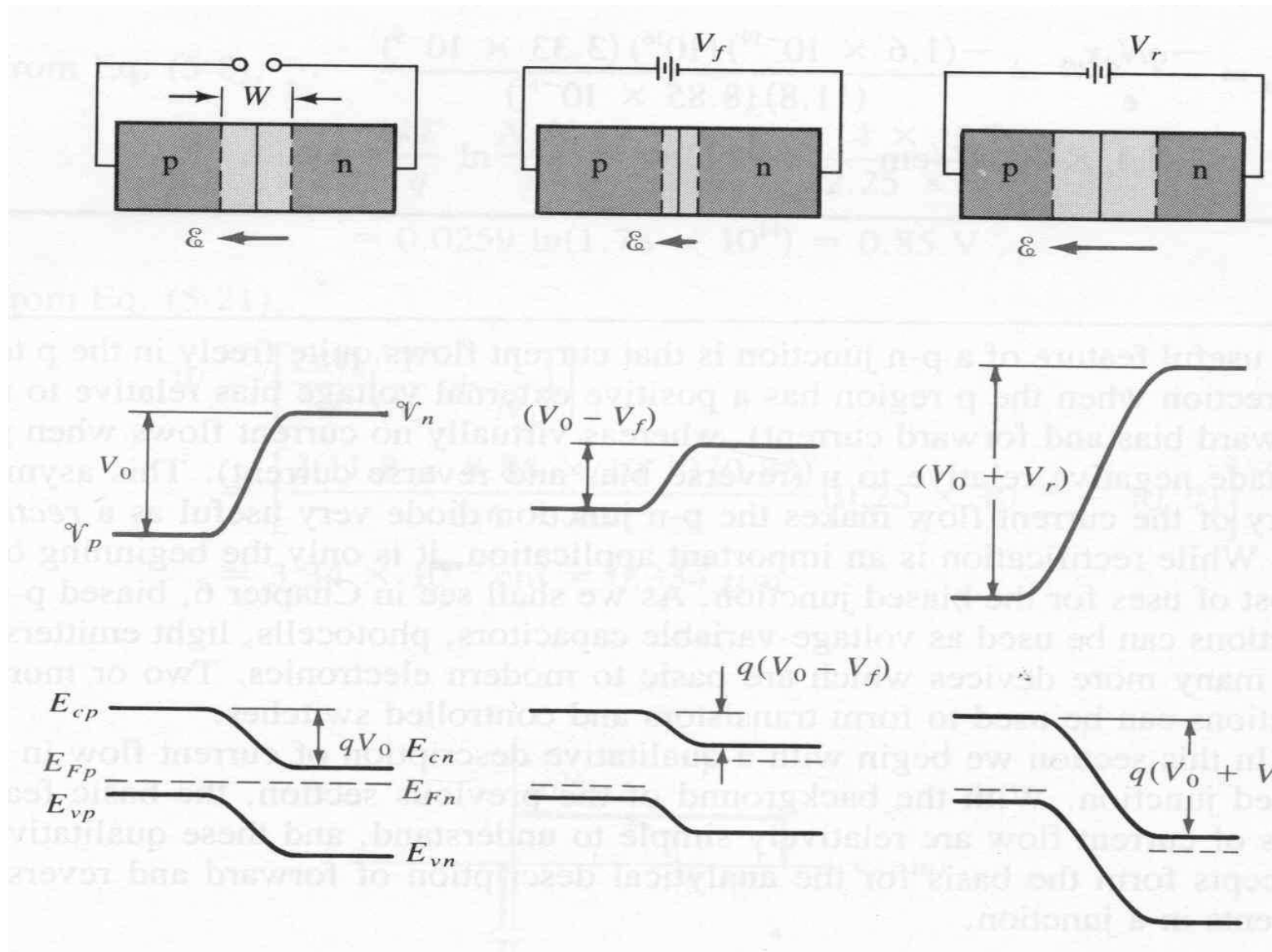
Unión PN



Equilibrio

Directa

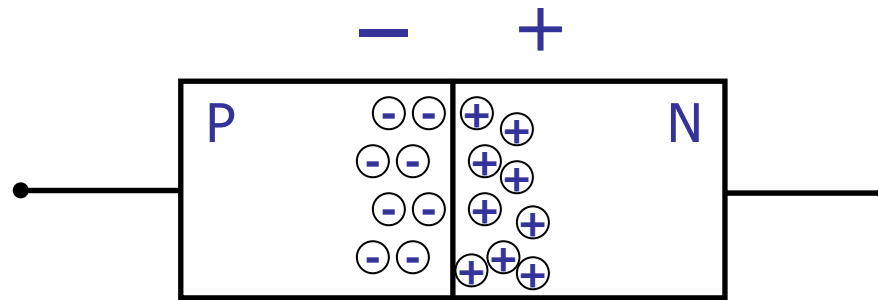
Inversa



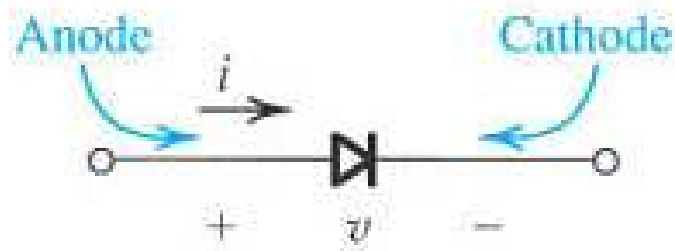
4.2 Diodo y transistor BJT

4.2.1 Diodo

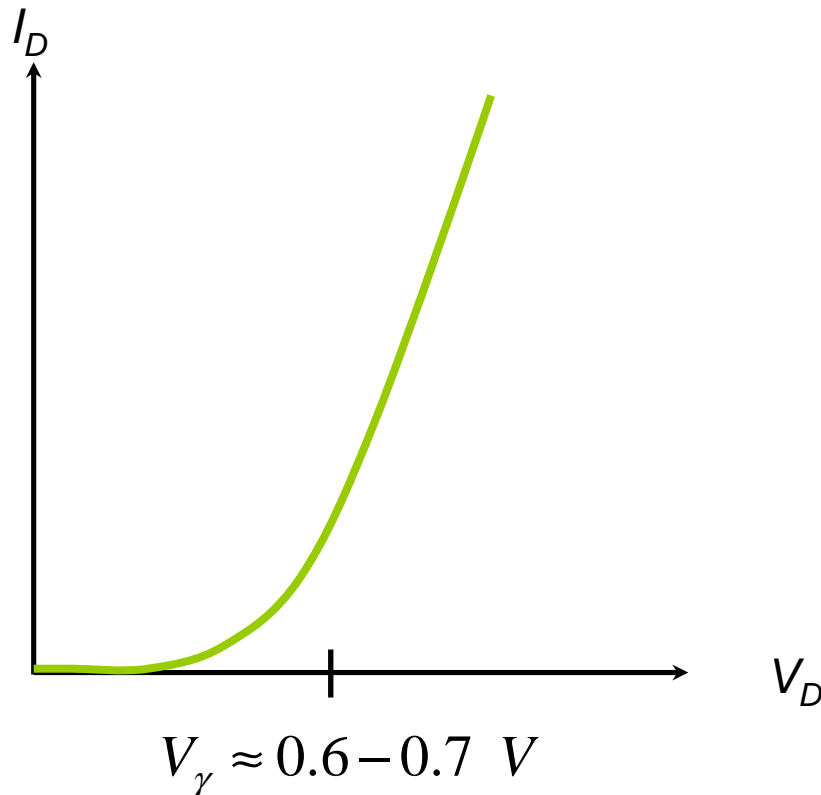
Un diodo de unión es una unión P-N con dos contactos óhmicos exteriores.



Su símbolo es:



Su característica, en primera aproximación:



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

$$V_T = \frac{kT}{q} = 26\text{mV} \text{ (300K)}$$

$$I_S = 10^{-14} \text{ A}$$

V_T : tensión térmica
 k : Cte. de Boltzman
 T : temperatura absoluta
 q : carga del electrón
 I_S : corriente inversa de saturación

Vamos a trabajar con modelos más sencillos, modelos lineales.

Modelos lineales

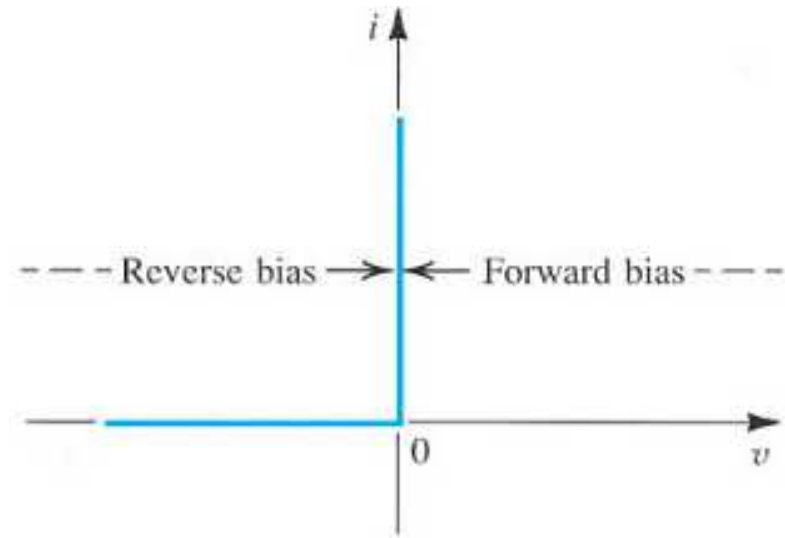
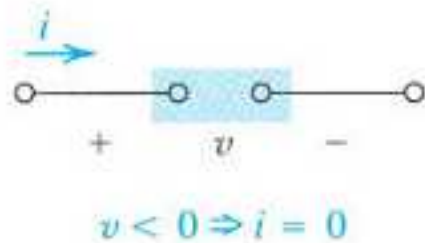
Los modelos que se suelen utilizar son:

Modelo 1

$$\text{si } V_D < 0 \Rightarrow I_D = 0$$

$$\text{si } V_D > 0 \Rightarrow I_D > 0$$

Es un buen modelo si $V_D \gg V_\gamma$

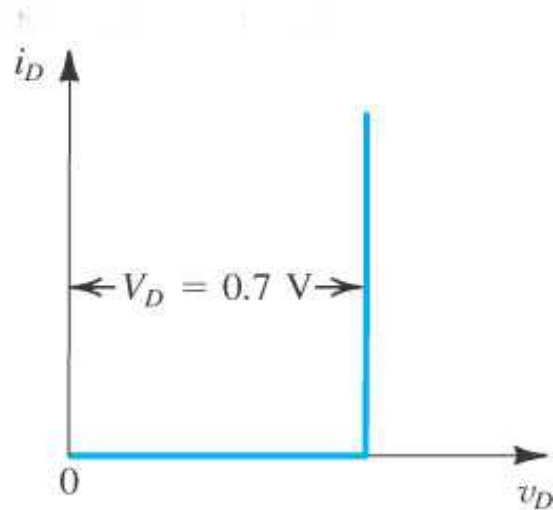
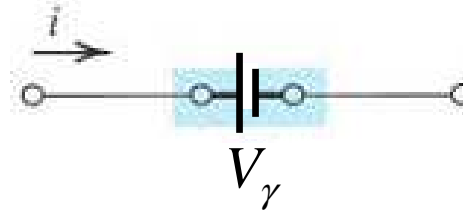
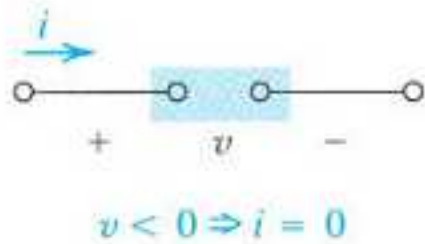


Modelo 2

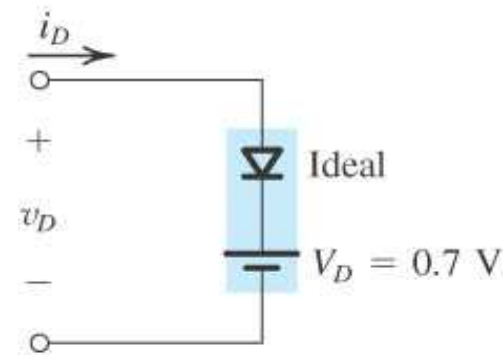
Tensión constante entre los extremos del diodo:

$$\text{si } V_D < V_\gamma \Rightarrow I_D = 0$$

$$\text{si } V_D > V_\gamma \Rightarrow I_D > 0$$



(a)



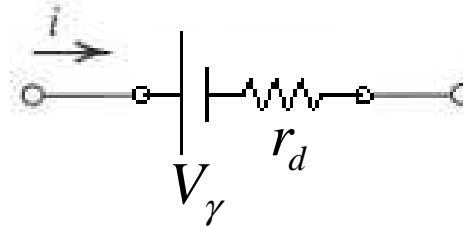
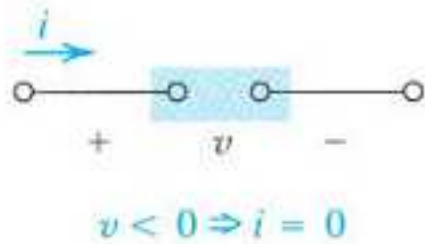
(b)

Modelo 3

Tensión variable entre los extremos del diodo:

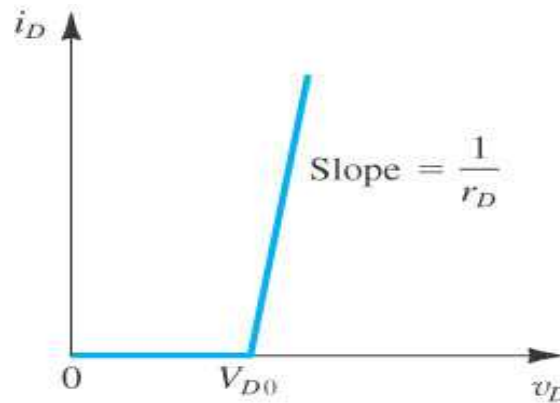
$$\text{si } V_D < V_\gamma \Rightarrow I_D = 0$$

$$\text{si } V_D > V_\gamma \Rightarrow I_D > 0$$

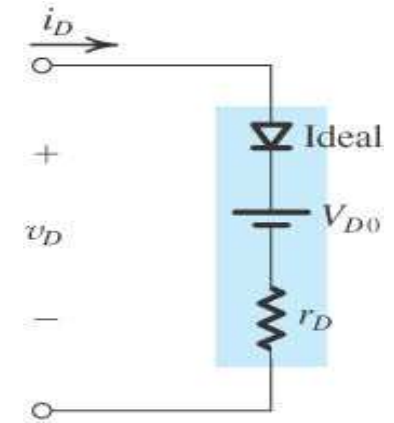


$$V_D = V_\gamma + I_D \cdot r_d$$

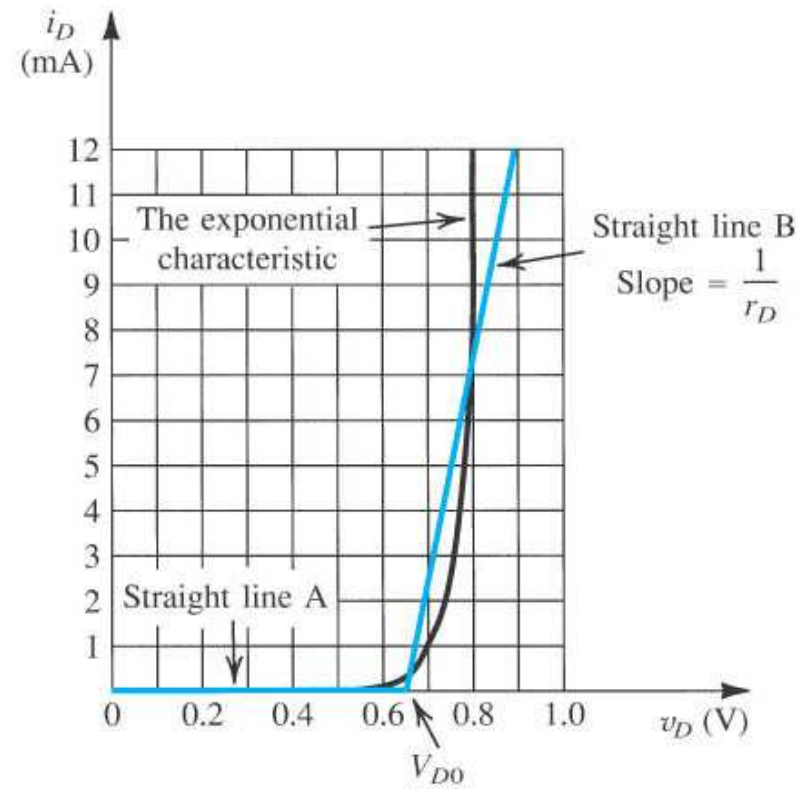
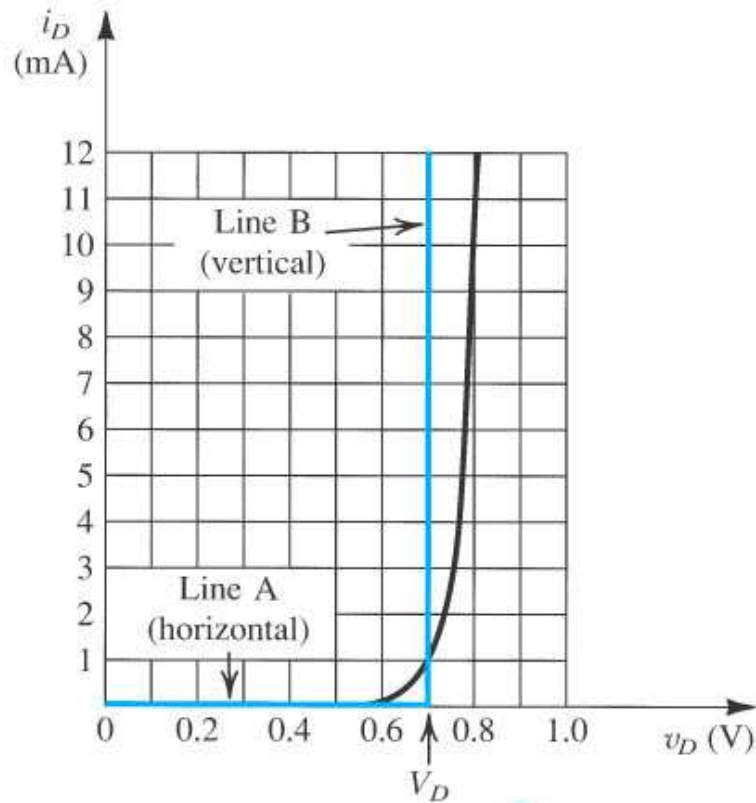
$$I_D = \frac{(V_D - V_\gamma)}{r_d}$$



(a)



(b)

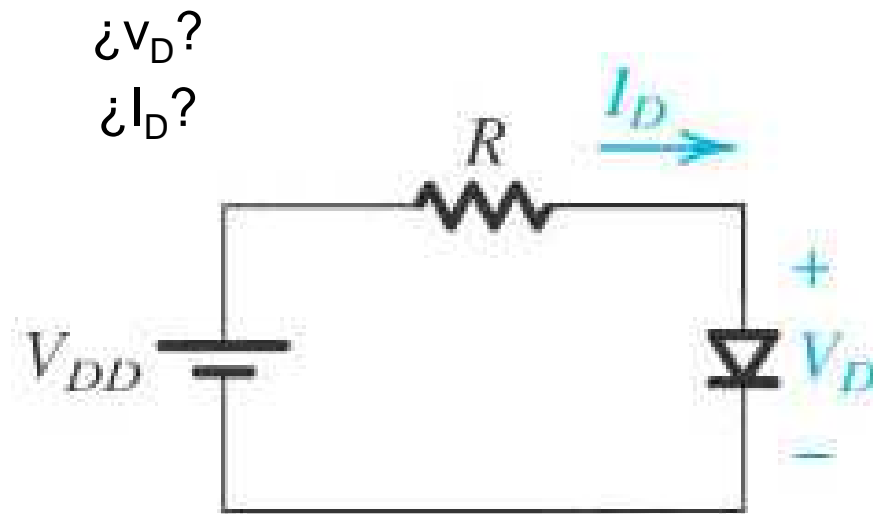


Según estos modelos en inversa es capaz de aguantar cualquier tensión, sin embargo, en directa el valor que aguanta el diodo es como mucho, un poco superior a V_D (V_γ), ya que con intensidades provocadas por tensiones mayores el dispositivo se fundiría.

Métodos de resolución

Vamos a ver 3 métodos, dos de ellos con el diodo real y el último (el más utilizado) con los modelos lineales.

Para ello vamos a resolver el siguiente problema:



Nota: en todos los circuitos

I (mA) y R (K Ω)

Datos:

$$V_{DD} = 5 \text{ V}$$

$$R = 1 \text{ K}\Omega$$

$$I_S = 10^{-11} \text{ mA}$$

$$V_T = 26 \text{ mV}$$

Método analítico (diodo real)

$$\begin{array}{l} \text{Circuito: } 5 \text{ V} = I_D \cdot 1 \text{ K} + V_D \\ \text{Dispositivo: } I_D = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right) \end{array} \Rightarrow 5 = I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right) + V_D$$

$$V_D = 5 - I_S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right) \quad \text{diodo real}$$

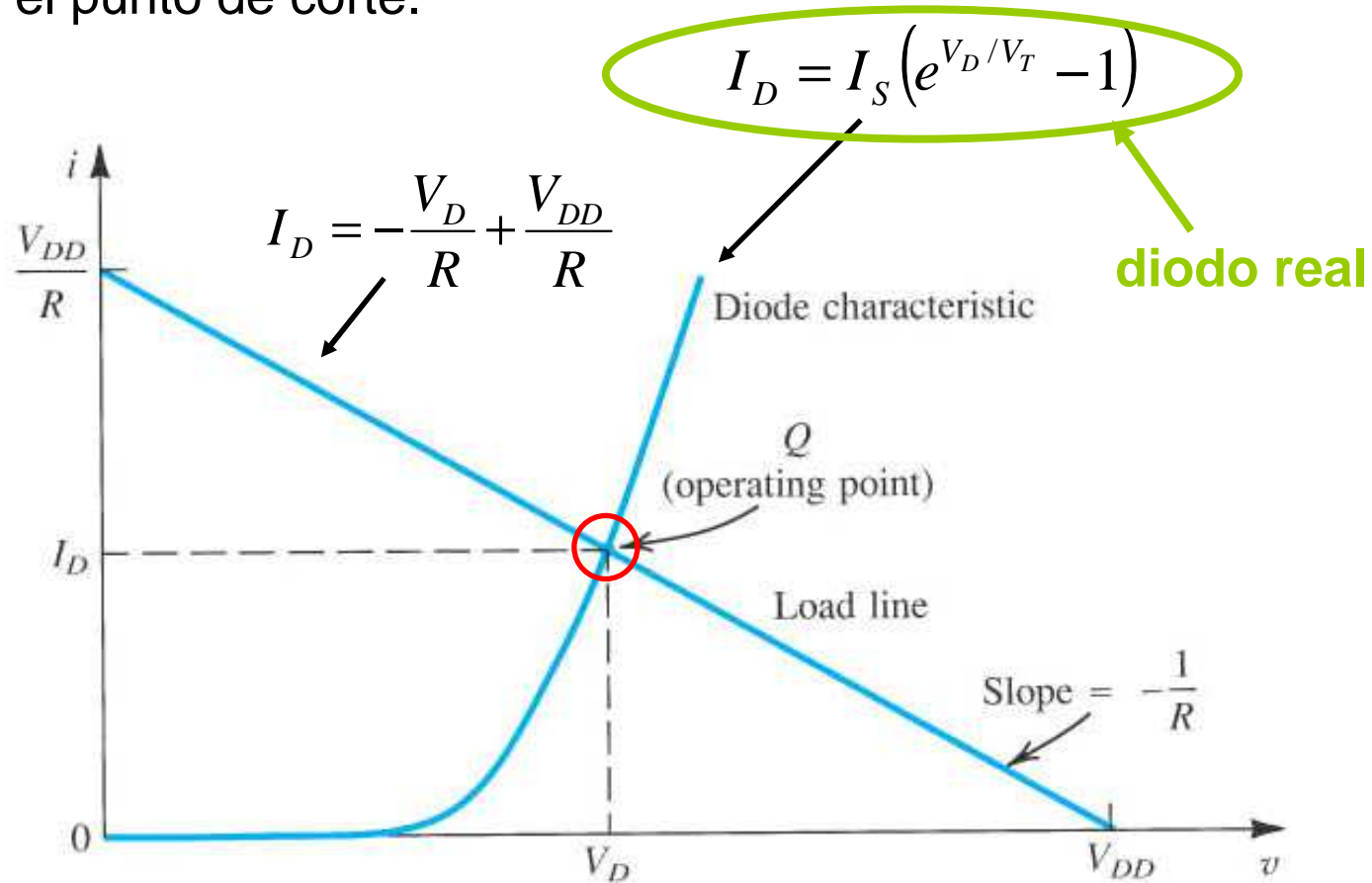
Sustituimos $V_D=0.65 \text{ V}$ en la exponencial y calculamos V_D . Repetimos hasta obtener la precisión requerida. Si lo hacemos en este ejemplo nos queda:

$$V_D = 0.696 \text{ V}$$

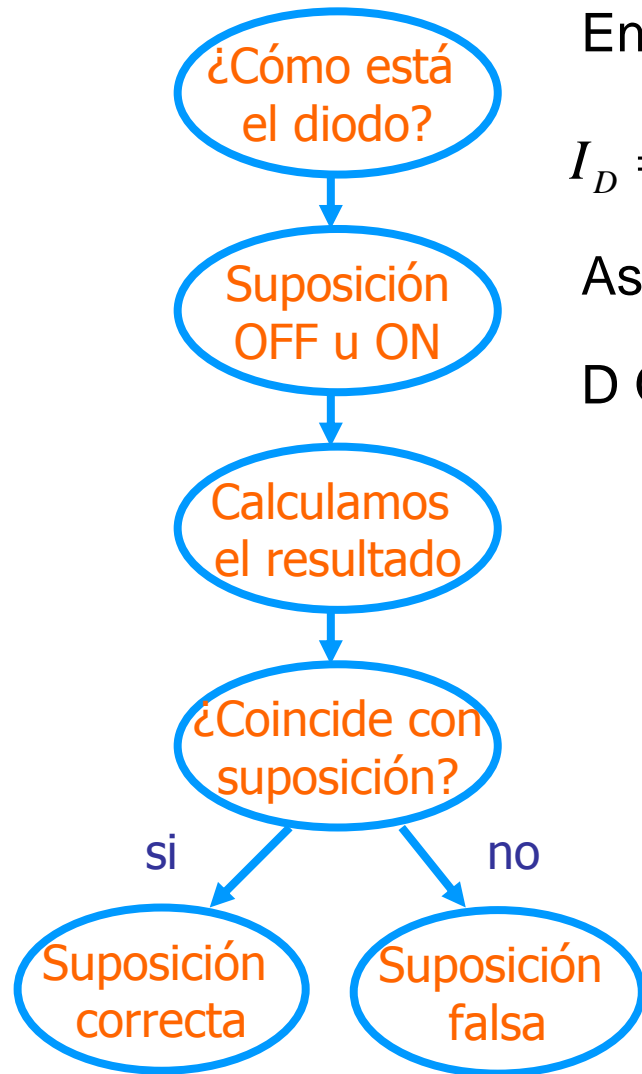
$$I_D = 4.3 \text{ mA}$$

Método gráfico (diodo real)

Consiste en colocar las dos ecuaciones de la recta en una gráfica y calcular el punto de corte.



Método lineal (modelo 3)



En nuestro circuito, supongamos que **D OFF**:

$$I_D = 0 \Rightarrow V_R = I \cdot R = 0 \Rightarrow V_D = 5\text{ V} > V_\gamma \Rightarrow \mathbf{D ON}$$

Así que la suposición **D OFF** era falsa.

D ON, por lo tanto según nuestro modelo:

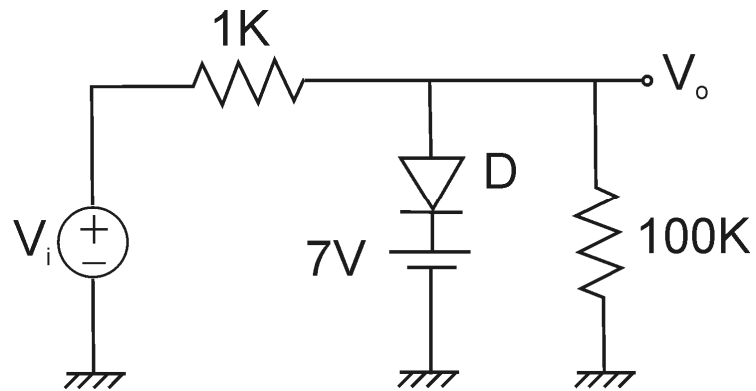
$$V_{DD} = I_D \cdot R + V_D \quad \text{modelo 3}$$
$$5 = I_D \cdot 1 + V_\gamma + I_D \cdot r_d \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD} - V_\gamma}{R + r_d}$$

Tomando los valores:

$$\begin{aligned} V_\gamma &= 0.65\text{ V} \\ r_d &= 10\ \Omega \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} I_D &= 4.307\text{ mA} \\ V_D &= 0.693\text{ V} \end{aligned}$$

Aplicaciones del diodo

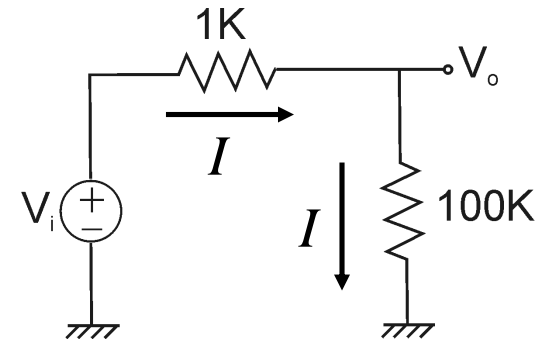
Limitador



Para que **D ON** $V_o \approx 7.65 \text{ V}$

a) Supongamos que V_i es baja de modo que **D OFF**

$$\left. \begin{array}{l} V_i = I(100 + 1) \\ I = V_o \cdot 100 \end{array} \right\} \Rightarrow V_o = \frac{100}{101} V_i$$



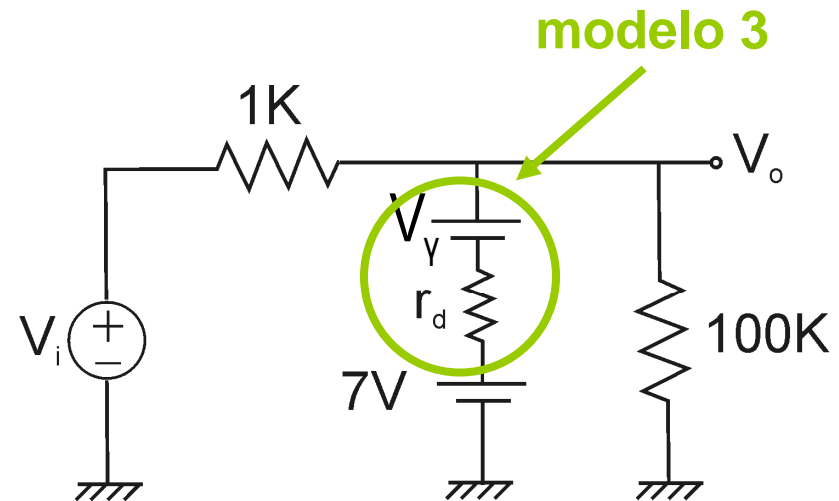
b) Supongamos que V_i aumenta $\rightarrow V_o$ aumenta (todavía D OFF)

Esta situación sigue así hasta que $V_o = 7.65 \text{ V} \Rightarrow V_i = \frac{101}{100} V_o = 7.73 \text{ V}$

c) Para $V_i > 7.73 \text{ V}$ **D ON**

$$\frac{V_i - V_o}{1} = \frac{V_o - 7.65}{r_d} + \frac{V_o}{100}$$

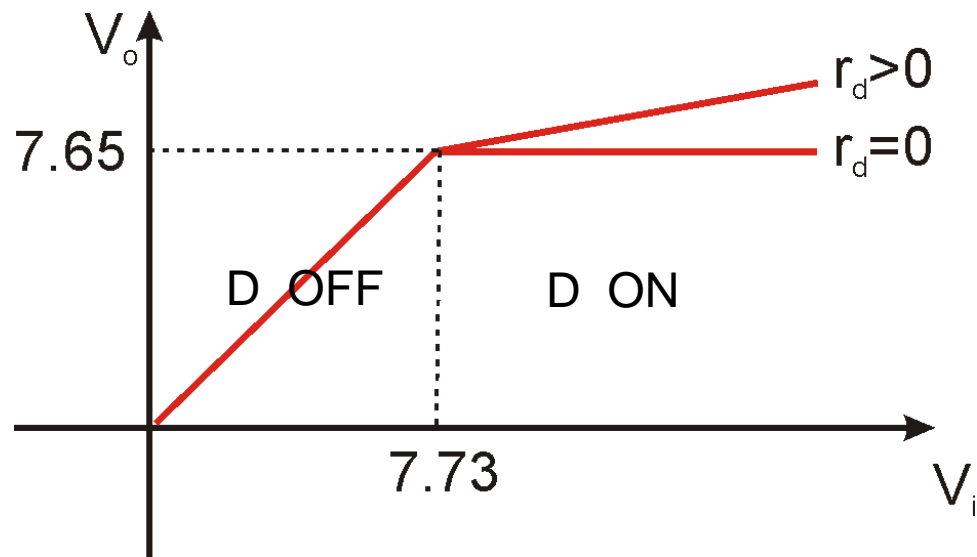
$$V_o = \frac{7.65}{100 + 101r_d} 100 + \frac{V_i r_d}{100 + 101r_d} 100$$



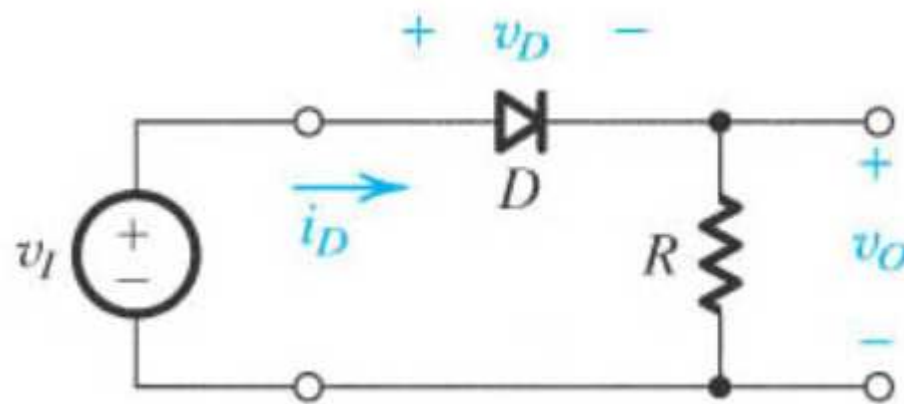
Nosotros usualmente tomamos $r_d = 0$

$$V_o = 7.65 \text{ V fijo} \Rightarrow \text{Si } V_i \uparrow \quad I_{1K} = \frac{V_i - V_o}{R} \uparrow$$

y como $I_{100K} = \frac{V_o}{100K}$ es constante, pasa más corriente por D



Rectificador de media onda: modelo 2 para el diodo



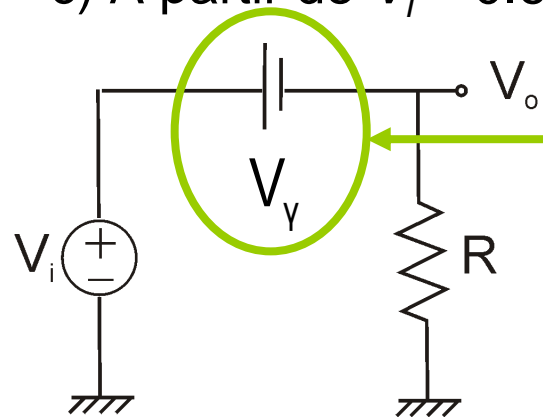
Para que **D ON** $V_i > V_\gamma$

a) Supongamos que V_i es baja de modo que **D OFF** $I_D = 0 \Rightarrow V_o = 0$

b) Supongamos que V_i aumenta ¿hasta cuando dura la situación anterior?

Esta situación sigue así hasta que $V_i > 0.65 \text{ V}$

c) A partir de $V_i = 0.65 \text{ V}$ **D ON**

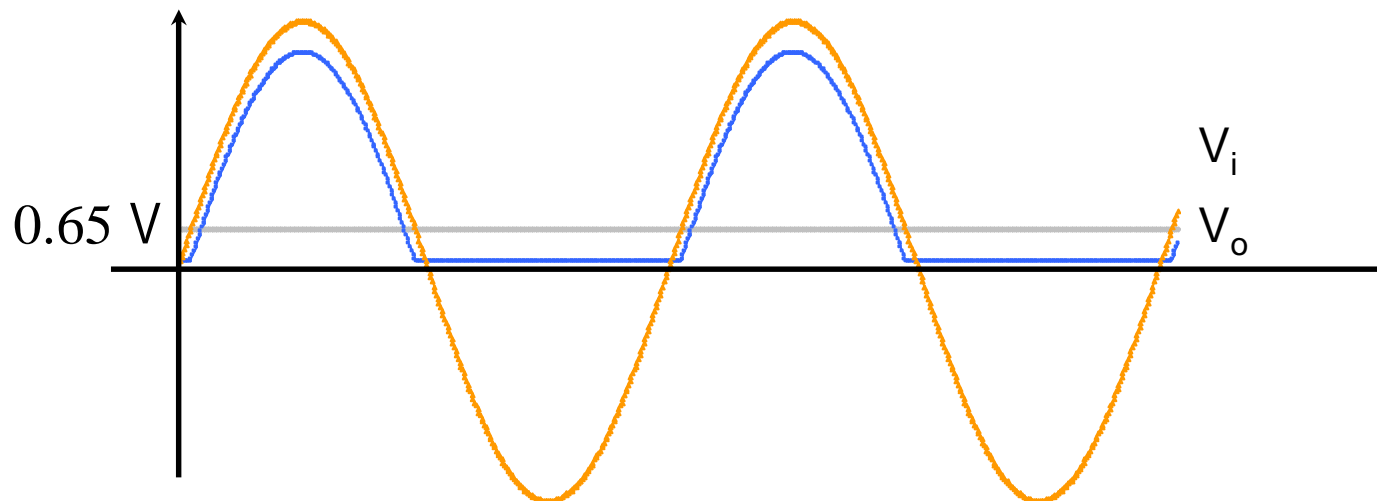


modelo 2

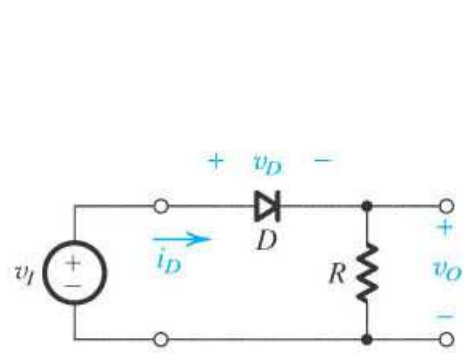
$$V_i < V_\gamma = 0.65 \text{ V} \Rightarrow \text{D OFF} \Rightarrow I_D \approx 0 \Rightarrow V_o = I_D \cdot R \approx 0 \text{ V}$$

$$V_i > V_\gamma = 0.65 \text{ V} \Rightarrow \text{D ON} \Rightarrow V_o = V_i - V_\gamma = V_i - 0.65 \text{ V}$$

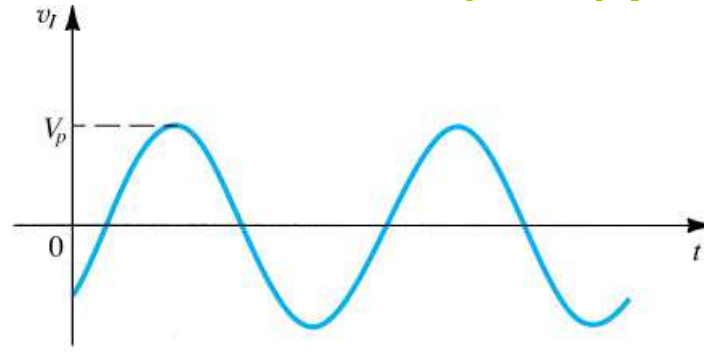
Para una señal alterna



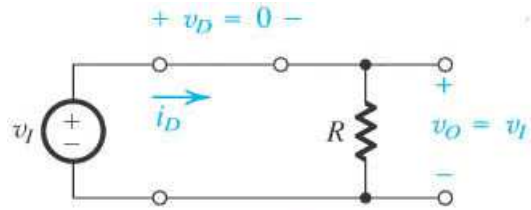
Rectificador de media onda: modelo 1 (ideal) para el diodo



(a)

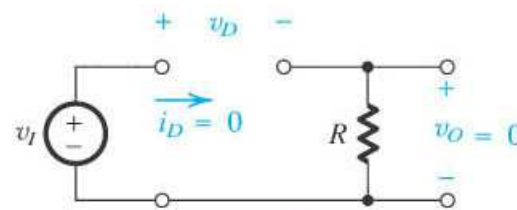


(b)



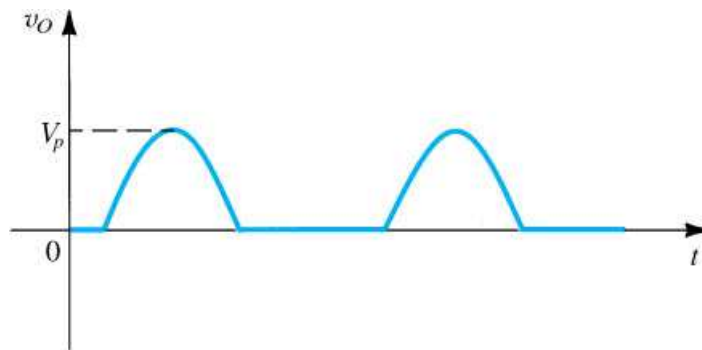
$v_I \geq 0$

(c)

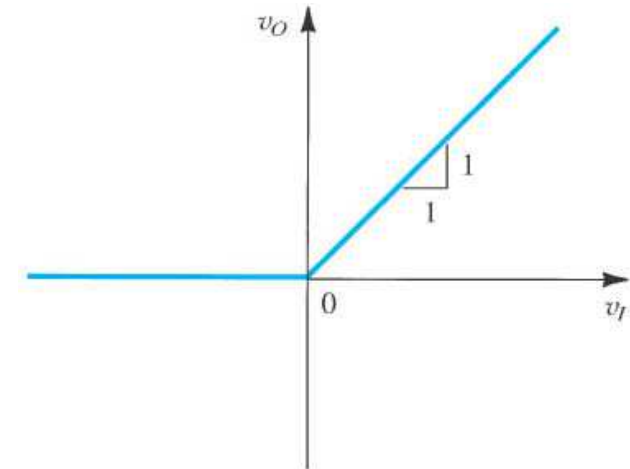


$v_I \leq 0$

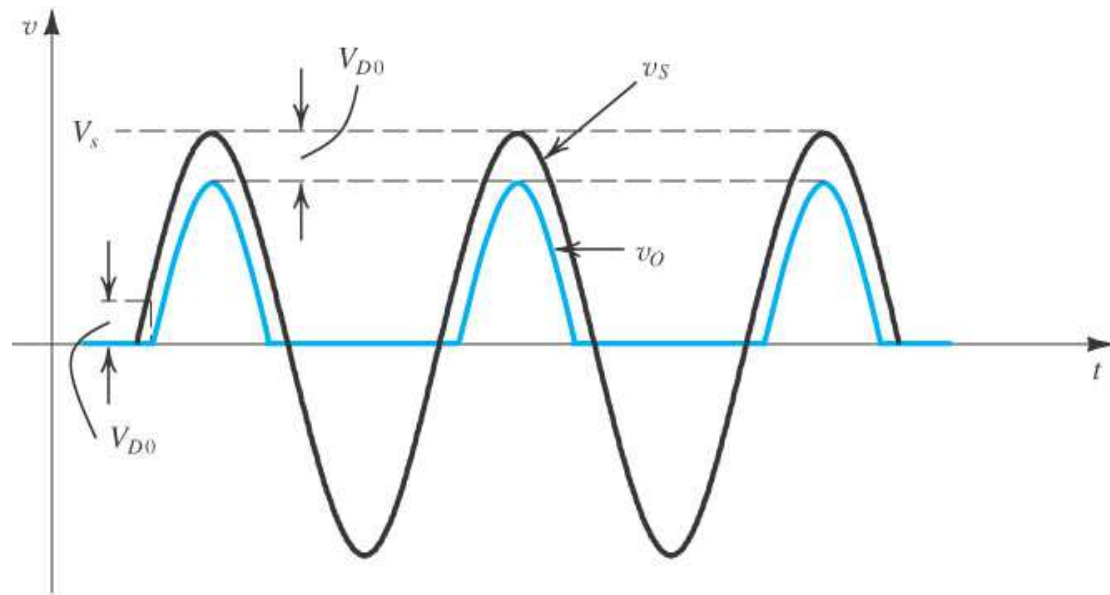
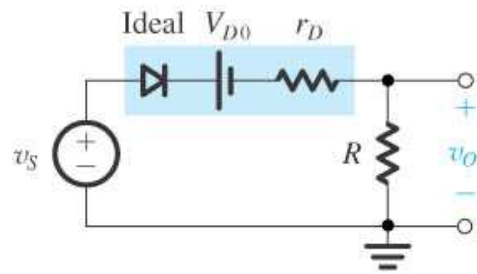
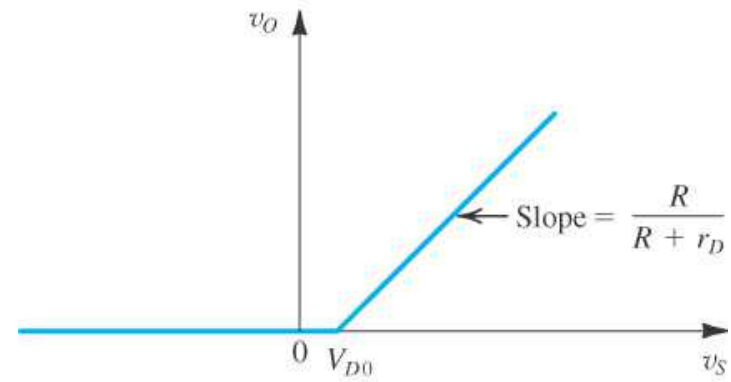
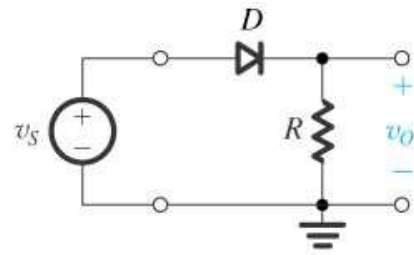
(d)



(e)



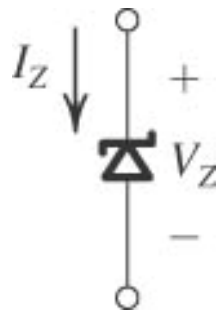
Rectificador de media onda: modelo 3 para el diodo



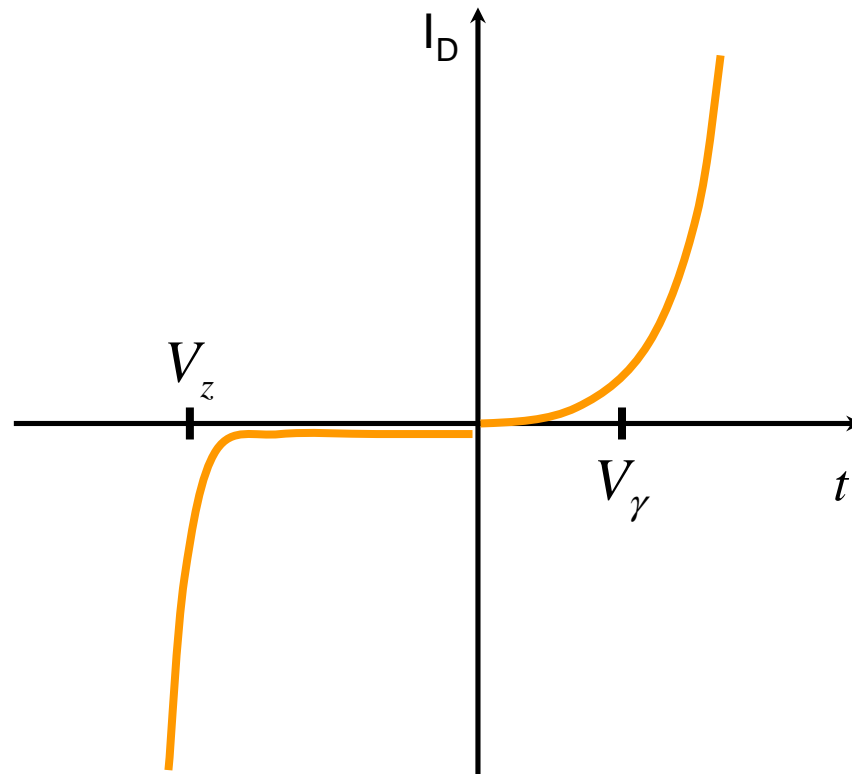
Diodo Zener

Es un caso particular del diodo. El Zener tiene la propiedad de conducir también bajo polarización inversa a partir de una cierta tensión V_z .

Símbolo

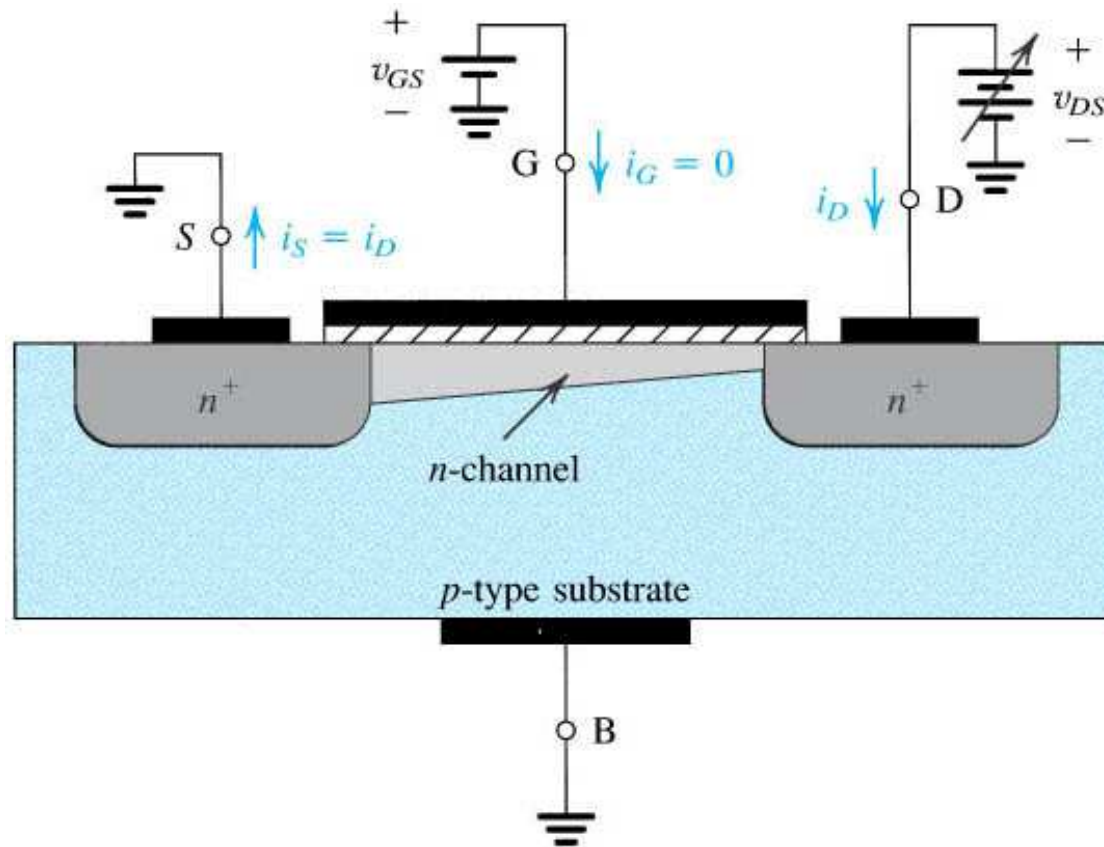


Característica $I_D - V_D$

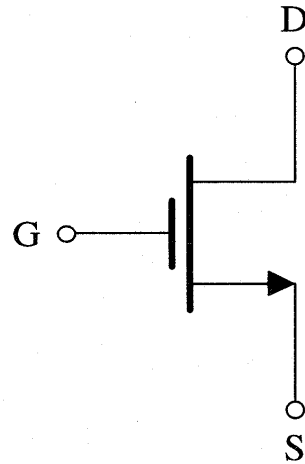
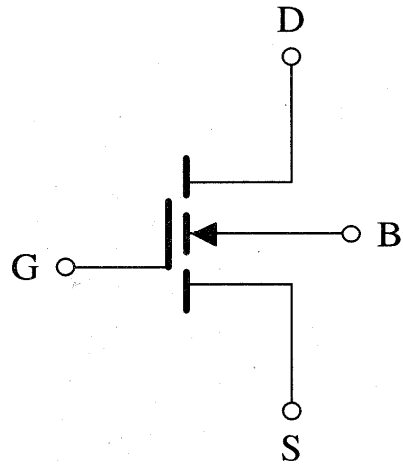


4.3. Transistor MOSFET

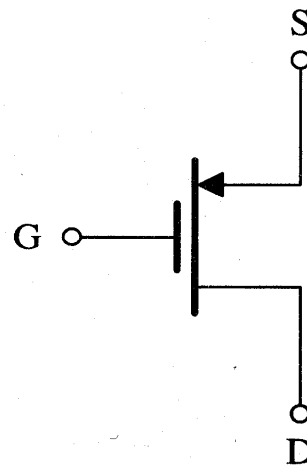
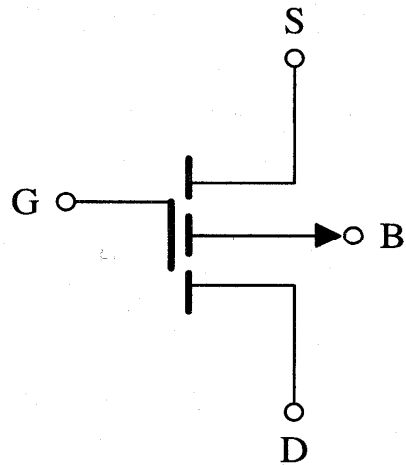
El transistor MOSFET se corresponde con el siguiente dispositivo:



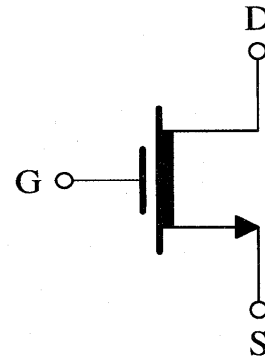
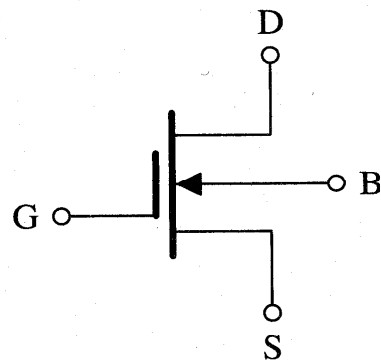
SÍMBOLO DEL NMOS:



Símbolo de un transistor MOS de canal N de enriquecimiento ($V_t > 0$).



Símbolo de un transistor MOS de canal P de enriquecimiento ($V_t < 0$).



Símbolo de un transistor MOS de canal N de deplexión. Igual que el dispositivo de enriquecimiento pero con $V_t < 0$.

k_n : transconductancia $k_n = \mu_n \cdot C_{ox} \frac{W}{L}$

μ_n : movilidad

C_{ox} : capacidad de óxido de puerta

W : anchura del canal

L : longitud del canal

MODOS DE OPERACIÓN DEL NMOS

1) NMOS OFF

$$V_{GS} < V_{Tn} \quad \text{NMOS OFF} \Rightarrow I_D = 0$$

2) NMOS ON

$$V_{GS} > V_{Tn} \Rightarrow \text{NMOS ON} \Rightarrow I_D \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} \text{a) lineal} \\ \text{b) saturación} \end{cases}$$

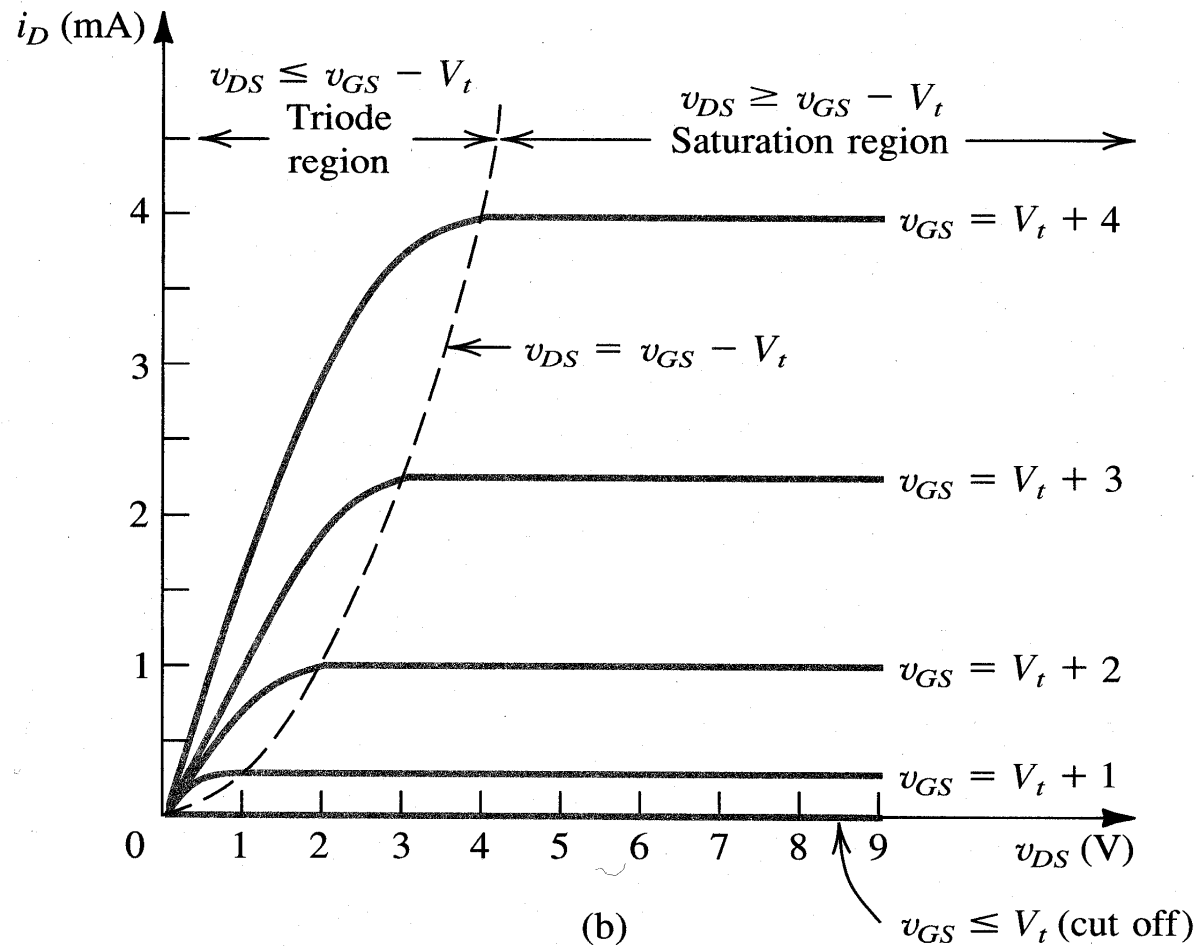
a) Triodo (lineal)

$$V_{DS} < (V_{GS} - V_{Tn}) \quad I_{DS} = k_n \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

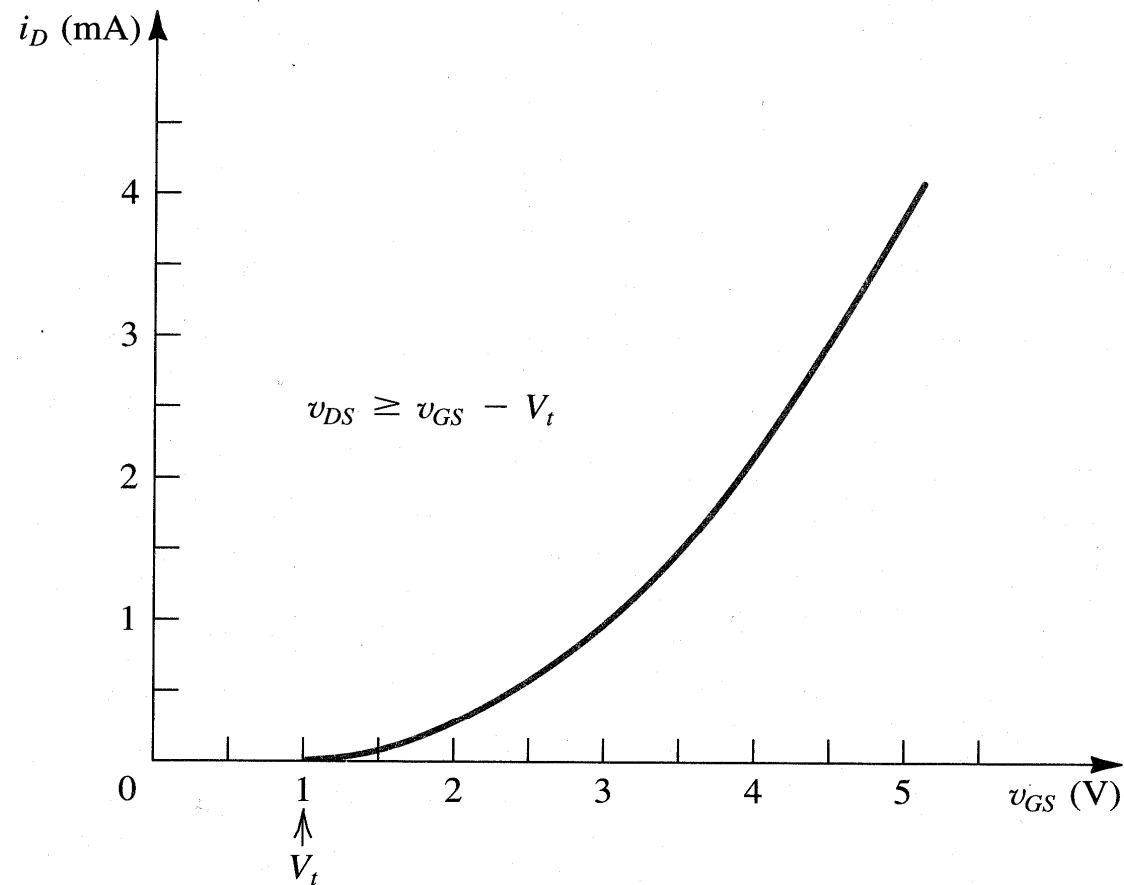
b) Saturación

$$V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{Tn}) \quad I_{DS} = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

Característica $I_D - V_{DS}$ para un MOSFET con $V_t = 1V$.



Característica $I_D - V_{GS}$ para un MOSFET con $V_t = 1V$.



MODOS DE OPERACIÓN DEL PMOS

1) PMOS OFF

$$V_{GS} > V_{Tp} \quad \text{PMOS OFF} \Rightarrow I_D = 0$$

2) PMOS ON

$$V_{GS} < V_{Tp} \Rightarrow \text{PMOS ON} \Rightarrow I_D \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} \text{a) lineal} \\ \text{b) saturación} \end{cases}$$

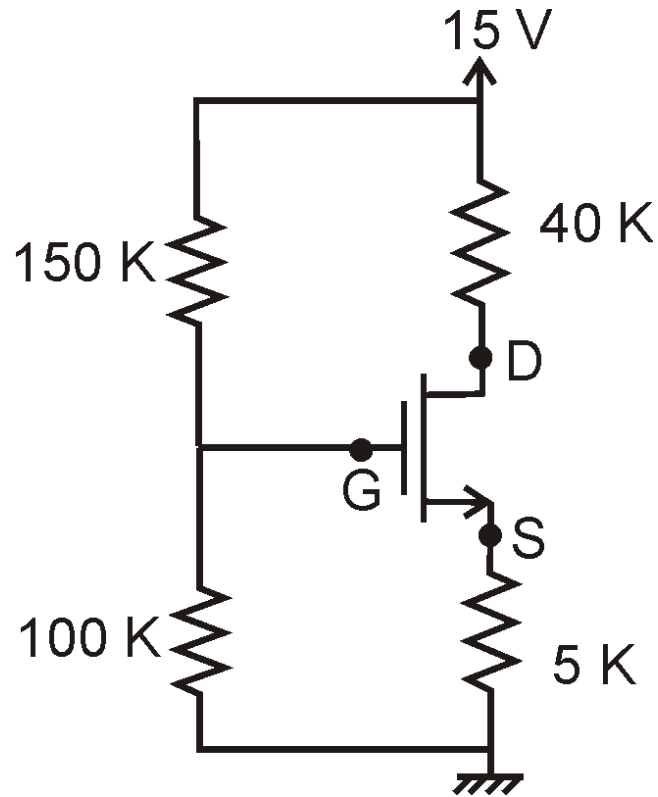
a) Triodo (lineal)

$$V_{DS} > (V_{GS} - V_{Tp}) \quad I_{SD} = k_p \left[(V_{GS} - V_{Tp}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

b) Saturación

$$V_{DS} \leq (V_{GS} - V_{Tp}) \quad I_{SD} = \frac{k_p}{2} (V_{GS} - V_{Tp})^2$$

Ejemplo:



Datos:

$$K = 40 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{V}^2}$$

$$V_T = 2 \text{ V}$$

Vamos a calcular V_G

1) Suponemos NMOS OFF $\Rightarrow I_G = 0$

$$i_1 = \frac{15 \text{ V}}{150 \text{ K} + 100 \text{ K}}, \quad V_G = i_1 \cdot 100 \text{ K} = \frac{15 \text{ V}}{250 \text{ K}} \cdot 100 \text{ K} = 6 \text{ V} \Rightarrow \text{NMOS ON}$$

2) NMOS ON $\Rightarrow I_D = I_S$ Vamos a suponer saturación

$$\left. \begin{array}{l} V_{CC} = I_D \cdot R_D + V_{DS} + I_D \cdot R_S \\ V_G = V_{GS} + I_D \cdot R_S \\ I_D = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 15 = I_D \cdot 45K + V_{DS} \quad (1) \\ 6 = V_{GS} + I_D \cdot 5K \quad (2) \\ I_D = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 4 - 4 \cdot V_{GS}) \quad (3) \end{array}$$

despejando I_D de (2) e igualando con (3):

$$\frac{6 - V_{GS}}{R_S} = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 4 - 4 \cdot V_{GS}) \Rightarrow V_{GS}^2 + 6 \cdot V_{GS} - 56 = 0$$

$$V_{GS} = \begin{cases} 5.06 \text{ V} \Rightarrow I_D = 0.1844 \text{ mA} \Rightarrow \text{de (1)} V_{DS} = 6.54 \text{ V} \\ \text{valor negativo} \end{cases}$$

vamos a comprobar si la suposición de saturación es correcta:

$$V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow 6.54 > 5.06 - 2 = 3.06 \quad \text{suposición correcta}$$