

Dispositivos semiconductores: el diodo

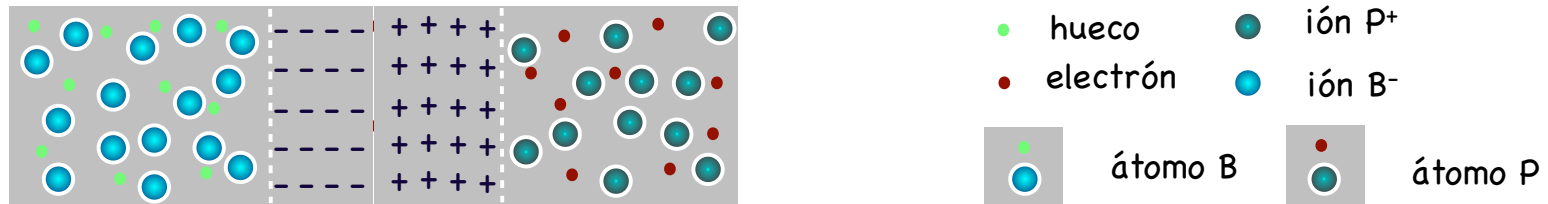
Tema 5

Contenidos

- ① Situación de equilibrio
- ② Polarización inversa
- ③ Polarización directa
- ④ Curvas características y modelos circuitales

Unión PN: situación de equilibrio

Una unión PN surge del contacto entre un semiconductor extrínseco tipo P y un semiconductor extrínseco tipo N



En un semiconductor tipo P, la concentración de huecos es muy superior a la de electrones libres. $p=N_A$, $n=n_i^2/N_A$

En un semiconductor tipo N, la concentración de electrones libres es muy superior a la de huecos. $n=N_D$, $p=n_i^2/N_D$

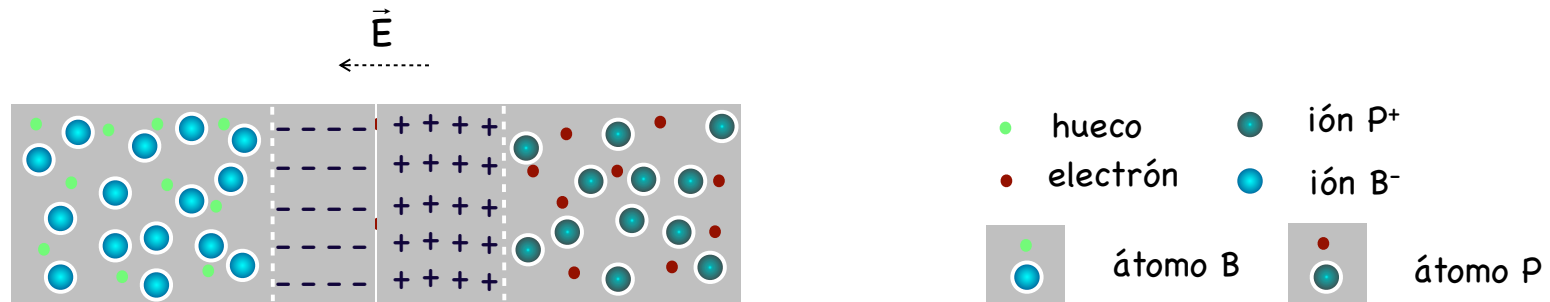
Si conectamos ambos tipos de semiconductores aparece un fuerte gradiente (desnivel) en la concentración de huecos y electrones en la frontera de la unión

Los electrones del semiconductor tipo N, próximos a la unión, se desplazarán hacia la izquierda (para disminuir el desnivel)

Los huecos del semiconductor tipo P, próximos a la unión, se desplazarán hacia la derecha (para disminuir el desnivel)

Una alta concentración de electrones encuentran una alta concentración de huecos \Rightarrow

Procesos de recombinación masivos



El resultado es un proceso masivo de recombinación al encontrarse un número elevado de electrones y huecos en la misma región

Y como consecuencia aparece un desajuste de carga espacial, próxima a la frontera (debido a la presencia de iones B^- y P^+) que genera un campo eléctrico

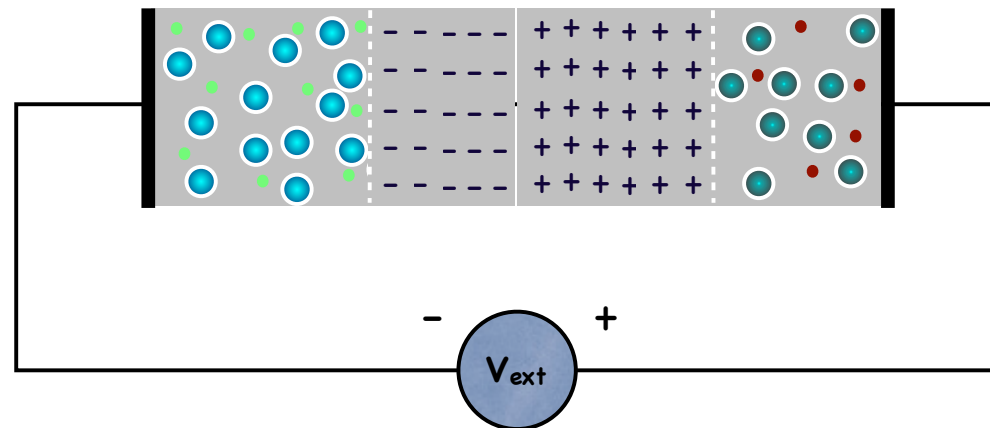
Este campo eléctrico se opone a la difusión de más carga móvil por lo que se alcanza una situación de equilibrio. Es decir, aparece una barrera de potencial V_0 ($E = -dV/dx$)

La barrera de potencial se denomina potencial de contacto. En situación de equilibrio los portadores mayoritarios (huecos en la zona P y electrones en la zona N) no pueden superar esa barrera para saltar al lado en el que son minoritarios

En realidad, lo que ocurre es que la corriente de arrastre, debido al campo eléctrico, iguala a la corriente de difusión, debido al desbalanceo en la concentración de portadores: $J_a = J_d$

Unión PN: Polarización inversa

Aplicamos un potencial externo al diodo, con el mismo signo que el potencial de contacto



Como resultado, electrones libres salen de la zona N, hacia el polo positivo de la fuente V_{ext} , depositándose más carga iónica en la zona de contacto entre los dos tipos de semiconductores (en el lado N)

Por otra parte, los electrones son repelidos desde el terminal negativo de V_{ext} , viajando hacia el semiconductor tipo P. Al entrar en éste, se producen fenómenos de recombinación. Estos electrones saltan de hueco en hueco hasta alcanzar la zona de vaciamiento (capa ausente de carga móvil), dando lugar a nueva carga estática negativa

Unión PN: Polarización inversa

Por lo tanto en esta situación la barrera de potencial aumenta oponiéndose aún más al trasvase masivo de carga a través de la zona de vaciamiento

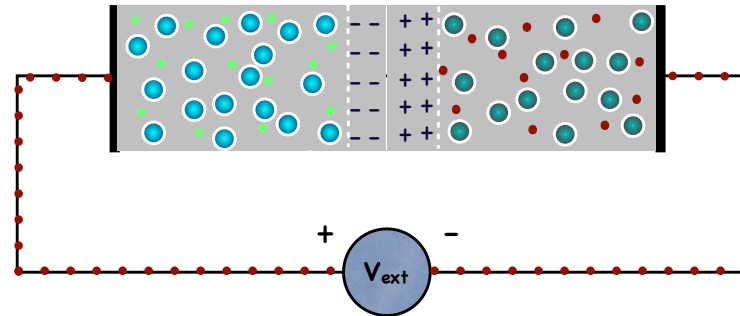
En cualquier caso, la corriente no es nula. Los huecos y electrones que aparezcan en la región de vaciamiento o próximos a ésta por procesos de generación espontánea (i.e., térmica) serán trasladados a la región donde son mayoritarios por efecto del campo eléctrico

Esta corriente, conocida como corriente de saturación en inversa (I_s) toma un valor muy pequeño y es consecuencia del desbalanceo entre la corriente de difusión (J_d) y la corriente de arrastre (J_a): $J_a > J_d$

Observación: La corriente sale en forma de electrones por el lado N y en forma de huecos por el lado P

Unión PN: Polarización directa

Aplicamos un potencial externo al diodo, en sentido contrario al del potencial de contacto



Como resultado, electrones libres viajan desde la fuente hacia la zona N del material semiconductor, la atraviesan, y alcanzan la región de vaciamiento

Este conjunto de electrones que alcanzan la región de vaciamiento neutraliza parcialmente la carga iónica depositada, por lo que la región de vaciamiento se estrecha y el potencial de contacto disminuye

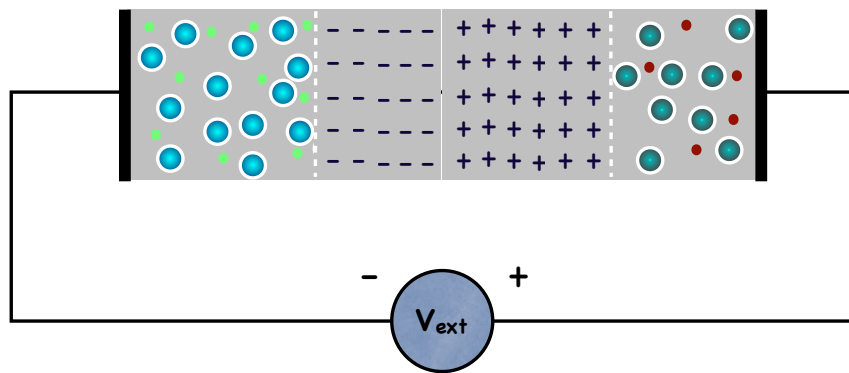
Como consecuencia, tiene lugar un mayor trasvase de electrones desde la zona N a la zona P (y de huecos desde la zona P a la zona N), originando una alta concentración de portadores minoritarios en los límites de la región de vaciamiento. Esto se traduce en una corriente de difusión muy elevada (diodo en conducción)

En definitiva la corriente de difusión pasa a tomar un valor muy importante, mientras que la corriente de arrastre se mantiene prácticamente constante: $J_a \ll J_d$

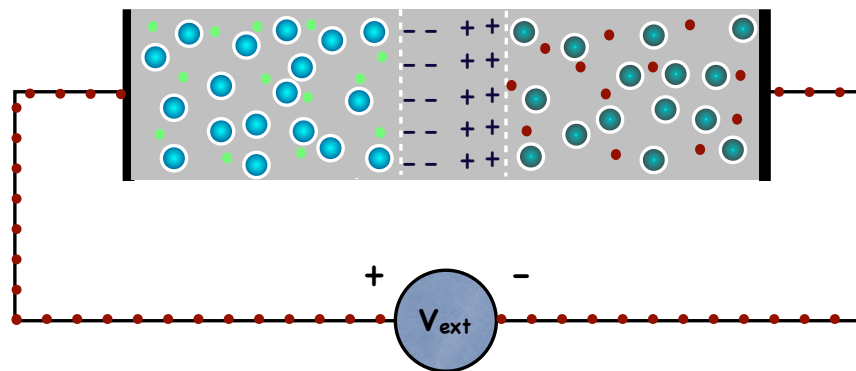
Observación: La corriente entra en forma de electrones en el lado N y en forma de huecos por el lado P

Efecto capacitivo

Nótese que la región de vaciamiento varía de grosor en función de la polarización. O, dicho de otro modo, la carga acumulada depende del valor de tensión en los terminales del diodo. Por lo tanto el diodo se comporta como un condensador



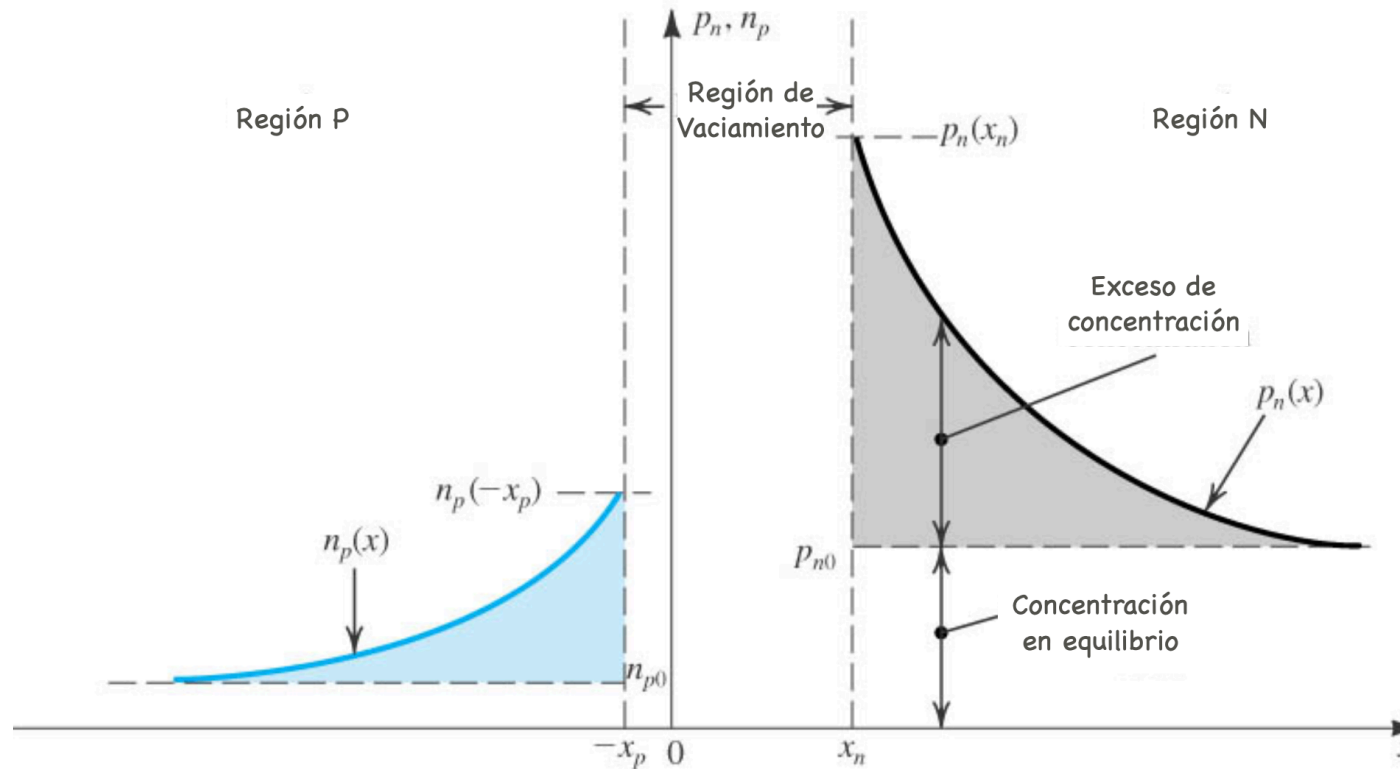
Polarización inversa

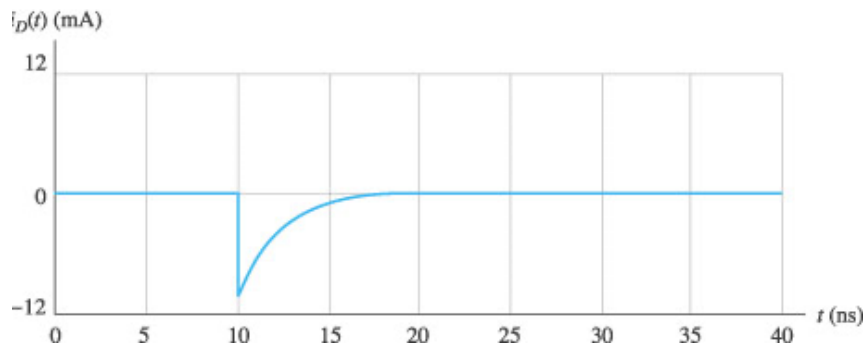
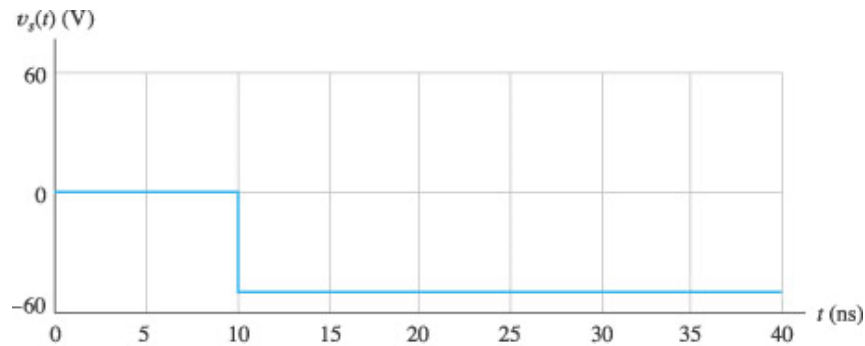
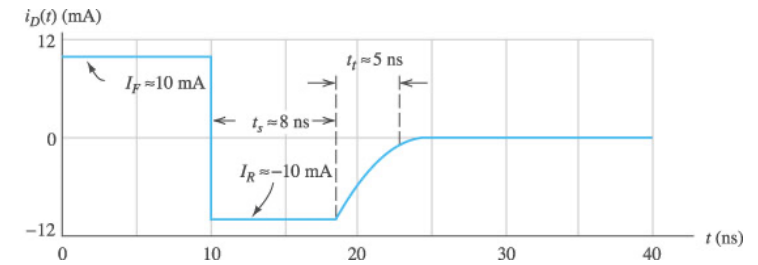
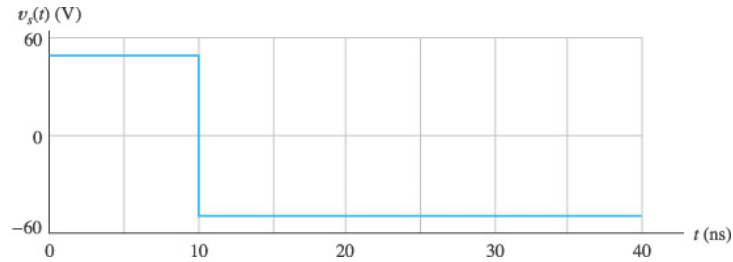
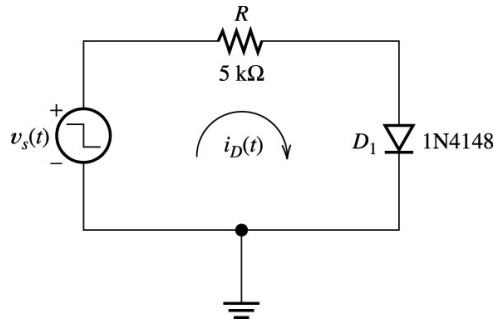


Polarización directa

Este tipo de capacidad se denomina capacidad de vaciamiento

Por otra parte, en polarización directa aparece un exceso de portadores en la frontera del material semiconductor (donde son minoritarios) y la capa de vaciamiento. Este exceso de carga móvil desaparece en polarización inversa, debido a la corriente de arrastre. Por lo tanto, la ausencia o presencia de esta carga, que depende del potencial en los terminales del diodo da lugar a otra componente capacitiva denominada capacidad de difusión





Capacidad de
difusión

Capacidad de
vaciamiento

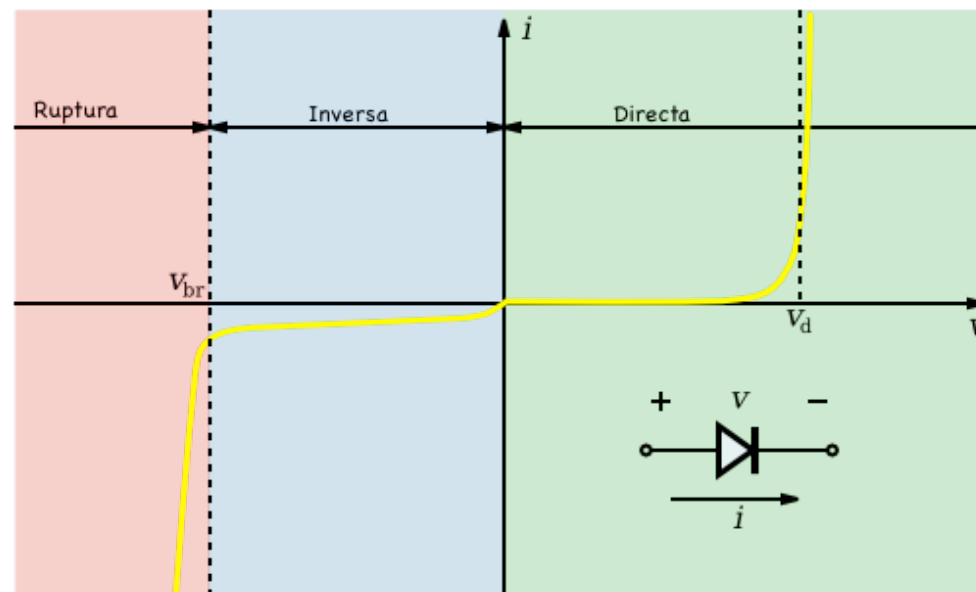
Curvas características

Al aplicar un potencial externo a los terminales, el diodo responde con una relación no lineal entre dicho potencial y la corriente que lo atraviesa

En inversa y directa la curva característica (i.e., relación I-V) prácticamente se corresponde con la función:

$$I = I_s \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$$

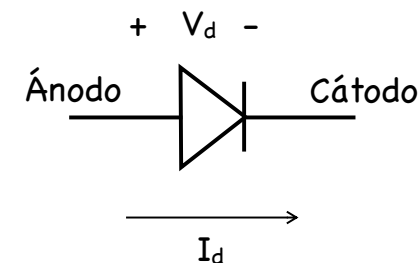
$v_T = KT/q \equiv$ Potencial térmico ($v_T \approx 25\text{mV}@300\text{K}$)
 $n \in [1,2] \equiv$ Parámetro dependiente de la tecnología



Modelos circuitales

Trabajar directamente con la expresión que relaciona la tensión y la corriente en un diodo es engorroso y poco práctica

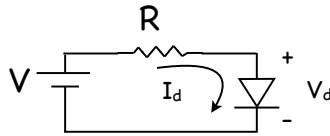
Generalmente se opta por modelos circuitales que aproximan el comportamiento del diodo para su análisis dentro de circuitos eléctricos



Modelo	Diodo en ON	Diodo en OFF	Gráfica
Conmutador con tensión de despegue y resistencia			
Conmutador con tensión de despegue			
Ideal			

(c) David López Vilariño, USC

Ejercicio: Obtener la caída de tensión y la corriente en el diodo para $V=5V$ y $R=1K\Omega$

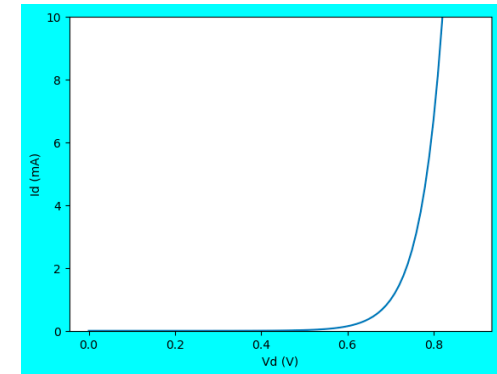


1. Modelo exponencial ($I_s=1.4nA$, $n=2$)
2. Modelo de tensión de despegue ($V_\gamma=0.65V$) y resistencia ($r_d=20\Omega$)
3. Modelo de tensión de despegue ($V_\gamma=0.7V$)
4. Modelo ideal

1. Modelo exponencial

El comportamiento en polarización activa la relación I_d/V_d responde aproximadamente a una curva de tipo exponencial

$$I_d \approx I_s e^{\frac{V_d}{nV_T}}$$

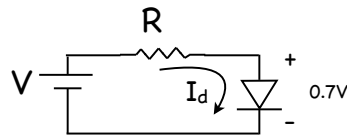


$$\left. \begin{array}{l} \text{Para un punto } (I_{d1}, V_{d1}) \Rightarrow I_{d1} \approx I_s e^{\frac{V_{d1}}{nV_T}} \\ \text{Para un punto } (I_{d2}, V_{d2}) \Rightarrow I_{d2} \approx I_s e^{\frac{V_{d2}}{nV_T}} \end{array} \right| \Rightarrow \frac{I_{d2}}{I_{d1}} \approx e^{\frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}} \Rightarrow \ln\left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}}\right) \approx \frac{V_{d2} - V_{d1}}{nV_T}$$

Despejando V_{d2} :

$$V_{d2} \approx V_{d1} + nV_T \ln\left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}}\right)$$

Necesitamos localizar un punto de la curva. En este caso cogemos $(I_{d1}, V_{d1}) = (1\text{mA}, 0.7\text{V})$

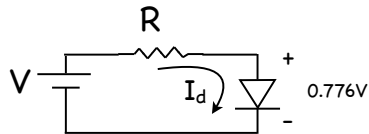


Si en el diodo hubiera 0.7V: $V - IR - 0.7 = 0 \Rightarrow I = (5 - 0.7)/1\text{K} = 4.3\text{mA} = I_{d2}$

Calculamos ahora V_{d2} :

$$V_{d2} \approx V_{d1} + nV_T \ln\left(\frac{I_{d2}}{I_{d1}}\right) = 0.7 + 5.2 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{4.3}{1}\right) = 0.776\text{V}$$

Y repetimos el proceso:



Si en el diodo hubiera 0.776V $\Rightarrow I_{d3} = 4.224\text{mA}$

Calculamos V_{d3} :

$$V_{d3} \approx V_{d2} + nV_T \ln\left(\frac{I_{d3}}{I_{d2}}\right) = 0.776 + 5.2 \times 10^{-3} \ln\left(\frac{4.224}{4.3}\right) = 0.775\text{V}$$

Como $V_{d3} \approx V_{d2}$ paramos

Solución:

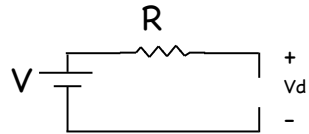
$$V_d = 0.775\text{V}$$

$$I_d = 4.224\text{mA}$$

2. Modelo de tensión de despegue y resistencia (V_γ, r_d)

El primer paso es averiguar si el diodo está en OFF o en ON

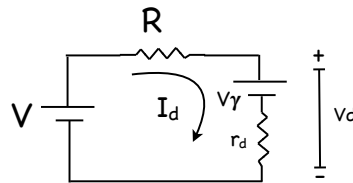
Diodo OFF $\Rightarrow I_d = 0$



En esta situación se cumple que $V_d = V = 5V$

Por lo tanto $V_d > V_\gamma \Rightarrow$ El diodo no puede estar OFF

Diodo ON $\Rightarrow V_d > V_\gamma$



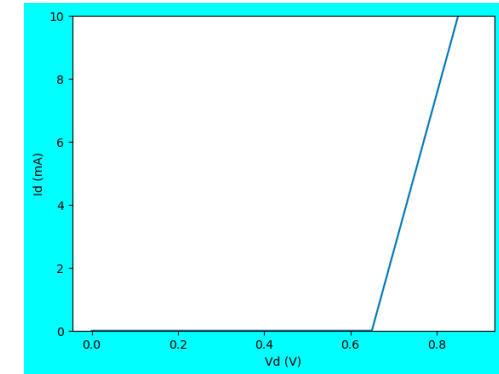
$$V - I_d R - V_\gamma - I_d r_d = 0 \Rightarrow I_d = 4.265 \text{ mA} > 0 \Rightarrow \text{Diodo ON}$$

$$V_d = V_\gamma + I_d r_d = 0.735 \text{ V}$$

Solución:

$$V_d = 0.735 \text{ V}$$

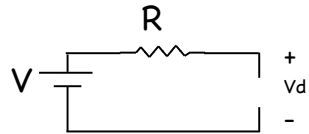
$$I_d = 4.265 \text{ mA}$$



3. Modelo de tensión de despegue (V_γ)

El primer paso es averiguar si el diodo está en OFF o en ON

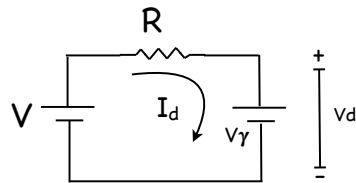
Diodo OFF $\Rightarrow I_d=0$



En esta situación se cumple que $V_d=V=5V$

Por lo tanto $V_d > V_\gamma \Rightarrow$ El diodo no puede estar OFF

Diodo ON $\Rightarrow V_d > V_\gamma$



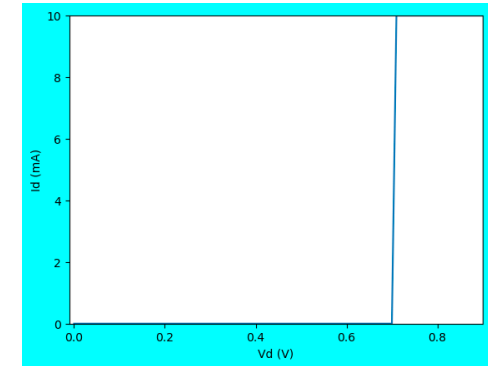
$$V - I_d R - V_\gamma = 0 \Rightarrow I_d = 4.3 \text{ mA} > 0 \Rightarrow \text{Diodo ON}$$

$$V_d = V_\gamma = 0.7 \text{ V}$$

Solución:

$$V_d = 0.7 \text{ V}$$

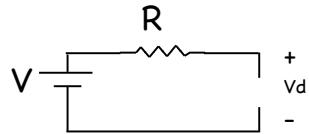
$$I_d = 4.3 \text{ mA}$$



4. Modelo ideal ($V_T=0$)

El primer paso es averiguar si el diodo está en OFF o en ON

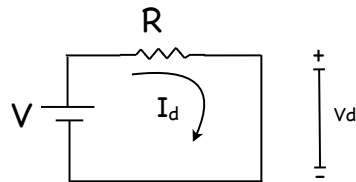
Diodo OFF $\Rightarrow I_d=0$



En esta situación se cumple que $V_d=V=5V$

Por lo tanto $V_d > 0 \Rightarrow$ El diodo no puede estar OFF

Diodo ON $\Rightarrow V_d > 0$



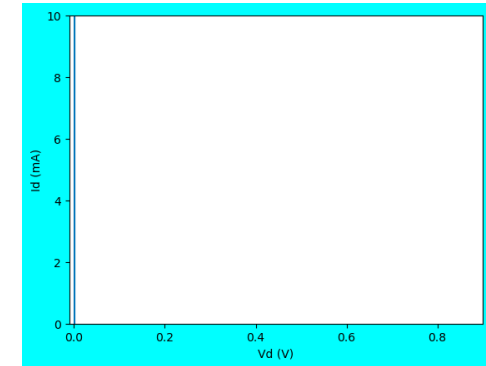
$$V - I_d R = 0 \Rightarrow I_d = 5\text{mA} > 0 \Rightarrow \text{Diodo ON}$$

$$V_d = 0V$$

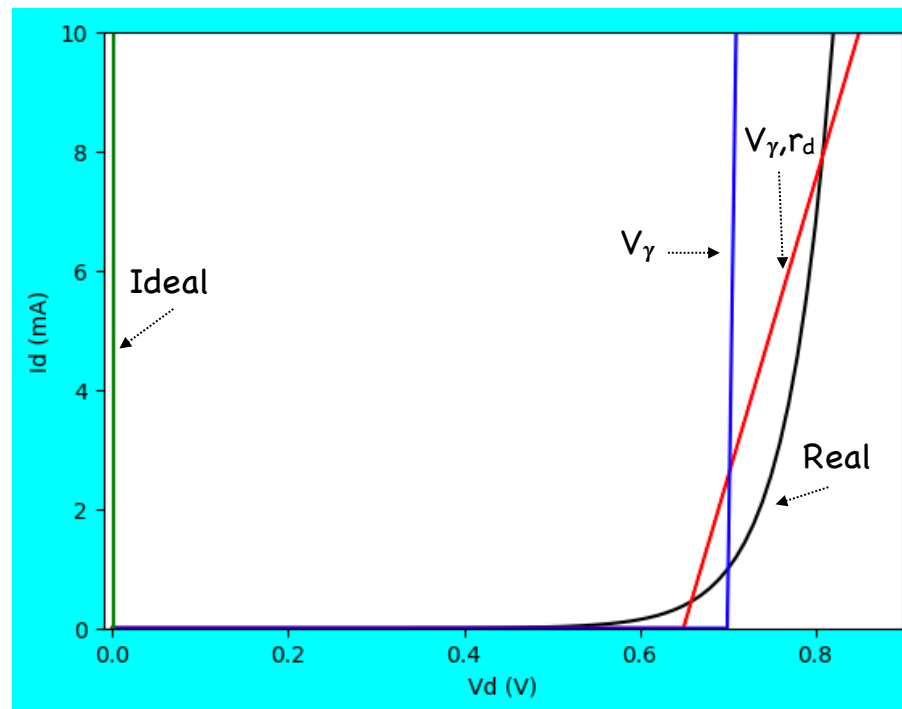
Solución:

$$V_d = 0V$$

$$I_d = 5\text{mA}$$

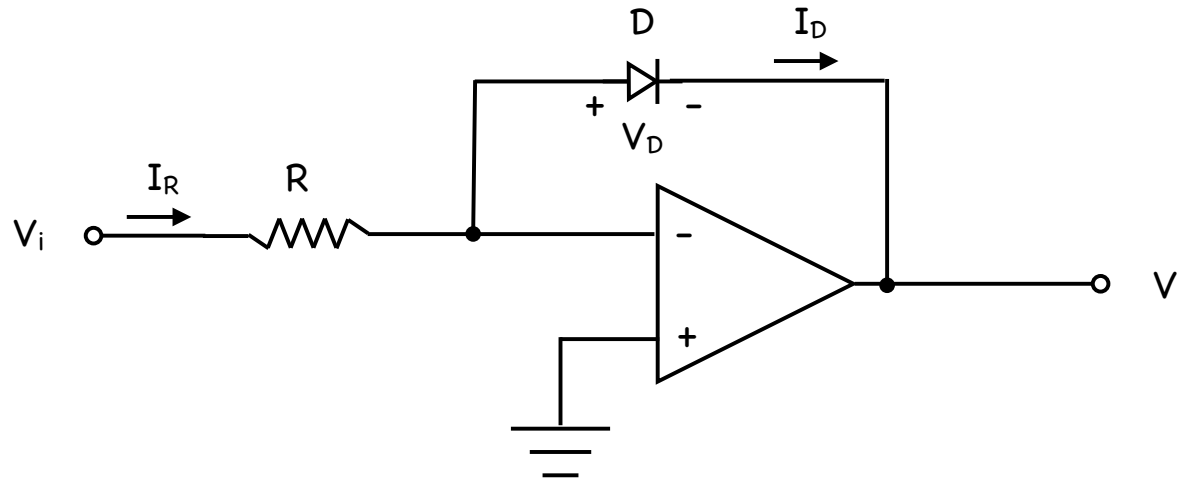


Precisión ↑	Modelo diodo "real" $\Rightarrow I_D=4.224\text{mA}$	Simplicidad ↓
	Modelo diodo $(V_\gamma, r_d) \Rightarrow I_D=4.265\text{mA}$	
	Modelo diodo $(V_\gamma) \Rightarrow I_D=4.3\text{mA}$	
	Modelo diodo "ideal" $\Rightarrow I_D=5\text{mA}$	



Variantes del amplificador operacional inversor

Logaritmo



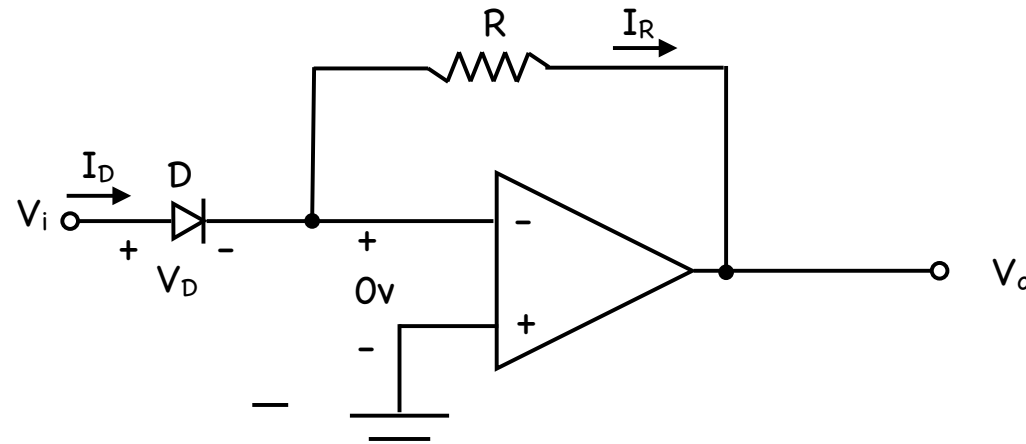
Asumiendo que $V_i > 0$ y por lo tanto el diodo estará polarizado en directa

$$I_D \approx I_s e^{\frac{V_D}{nV_T}}$$

$$\left. \begin{array}{l} I_R = I_D \\ I_R = \frac{V_i - 0}{R} \\ I_D \approx I_s e^{\frac{0 - V_o}{nV_T}} \end{array} \right| \Rightarrow \frac{V_i}{R} \approx I_s e^{\frac{-V_o}{nV_T}} \Rightarrow \ln\left(\frac{V_i}{I_s R}\right) \approx \frac{-V_o}{nV_T} \Rightarrow V_o \approx -nV_T \ln\left(\frac{V_i}{I_s R}\right)$$

Variantes del amplificador operacional inversor

Exponencial



$$\left. \begin{aligned} I_R &= I_D \\ I_R &= \frac{0 - V_o}{R} \\ I_D &\approx I_s e^{\frac{V_i - 0}{nV_T}} \end{aligned} \right| \Rightarrow V_o \approx -RI_s e^{\frac{V_i}{nV_T}}$$