



TEMA 3. Corrientes eléctricas: Conductores y semiconductores

1. Introducción
2. Movimiento de cargas en un conductor
3. Ley de Ohm
4. Potencia eléctrica
5. Materiales semiconductores: características.
6. Corrientes en semiconductores
7. Dispositivos: diodo de unión y transistor de unión (BJT)





Introducción: Corriente eléctrica

- En función de la capacidad de una sustancia para dejar circular la corriente en su interior, los materiales los clasificamos en:
 - **Conductores:** Al aplicar una diferencia de potencial entre dos puntos del material se establece de inmediato un flujo de corriente, ofreciendo poca resistencia al movimiento de cargas en su interior.
 - **Aislantes:** Materiales cuyas cargas están fuertemente ligadas entre sí y presentan mucha dificultad para moverse.
 - **Semiconductores:** Pueden comportarse como conductor y/o aislante. Su capacidad par conducir una corriente eléctrica puede variar considerablemente dependiendo de las condiciones de trabajo.



Introducción: Sólidos (tipos de enlaces)

Amorfo: Las partículas que conforman el sólido carecen de una estructura ordenada

Cristalino: Distribución tridimensional regular de sus partículas

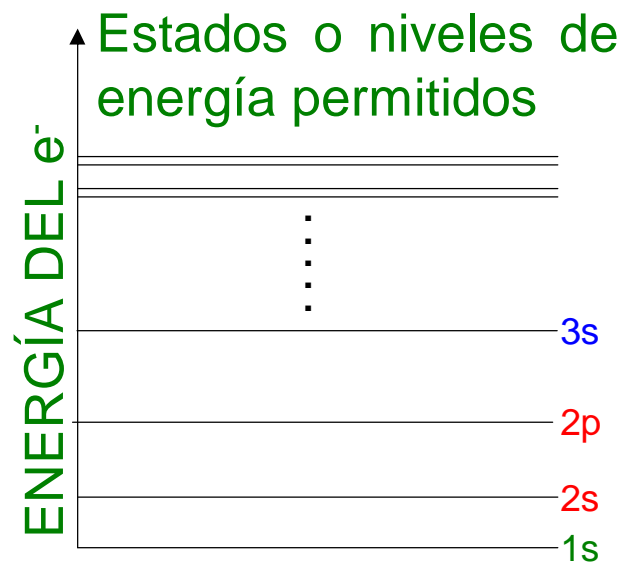
En los sólidos cristalinos, si tenemos en cuenta las fuerzas involucradas en la interacción entre sus partículas, los enlaces son:

- **Iónico:** atracción electrostática entre iones
- **Covalente:** uno o más electrones se comparten entre dos átomos para alcanzar configuraciones estables
- **Metálico:** los átomos ceden electrones de valencia para alcanzar configuración de gas noble. Los iones conforman una red cristalina muy compacta y se forma una nube de electrones entre los núcleos positivos.
- **Intermoleculares:** Puente de hidrógeno, fuerzas de Vander Waals, etc.

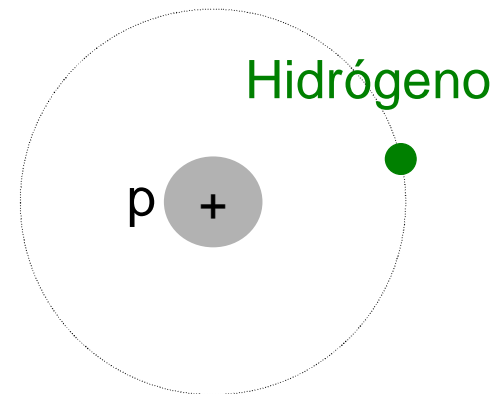
Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

• Estructura electrónica.

Los niveles de energía en un átomo se hallan cuantizados.



$^1\text{Hidrógeno: } 1s^1$

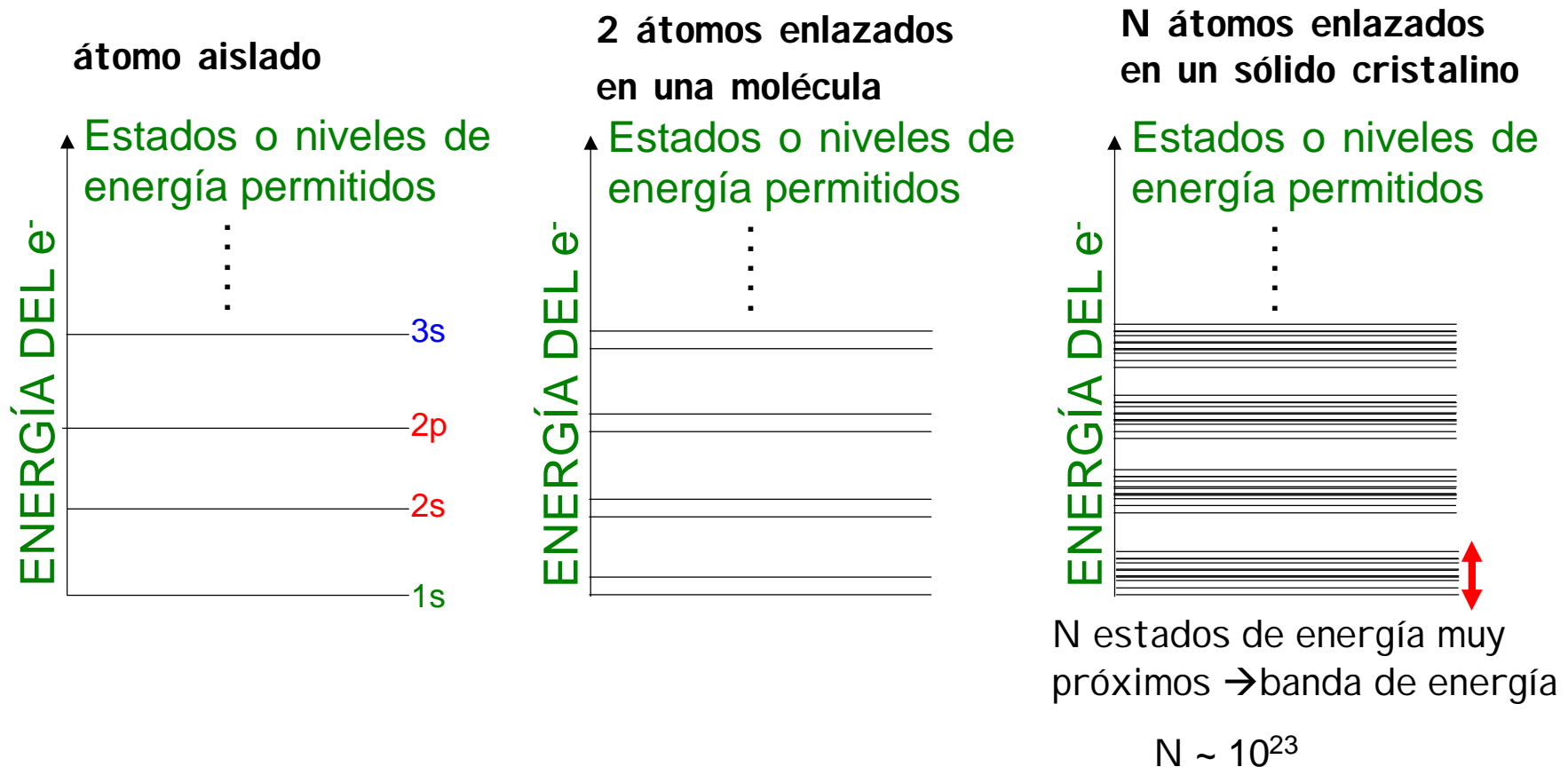


En estos estados el electrón no irradia energía. La radiación se emite cuando el electrón cambia de un estado a otro

Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

• Estructura electrónica. Desdoblamiento de los niveles electrónicos

Al formarse un sólido cristalino el movimiento de los electrones resulta perturbado debido a la influencia de los átomos vecinos → desdoblamiento de los niveles de energía → formación de bandas de energía



Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

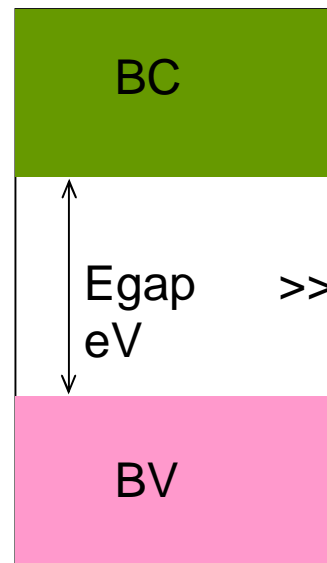
•Modelo de bandas de energía.

Las propiedades de conducción del sólido vienen dadas por la estructura de las dos últimas bandas de energía, ya que son las únicas que poseen electrones deslocalizados (compartidos) por todos los átomos del sólido:

- BANDA DE VALENCIA: última banda con electrones (total o parcialmente llena)
- BANDA DE CONDUCCIÓN: banda inmediatamente superior a BV (vacía a $T=0$ K)

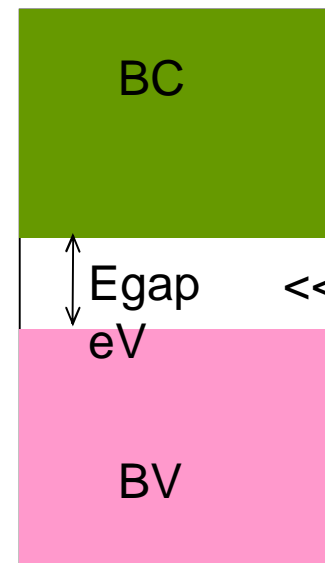


Conductor



Aislante

$E_g(\text{diamante}) = 6$
eV



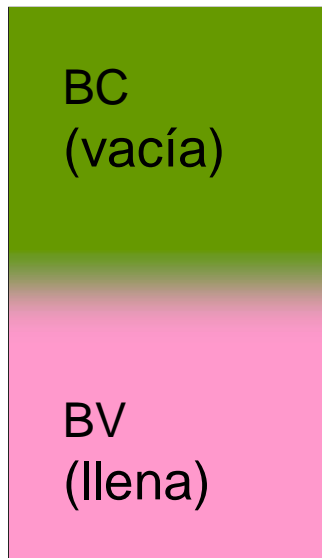
Semiconductor

$T = 300$ K
 $E_g(\text{Si}) \approx 1,1$ eV
 $E_g(\text{Ge}) \approx 0,7$ eV

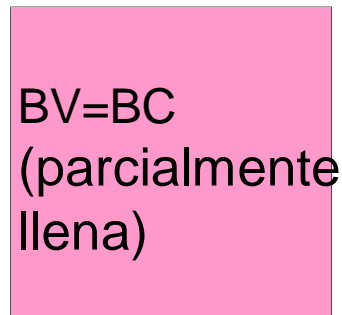
Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

•Modelo de bandas de energía. Conductor

Situación 1:
solapamiento
entre bandas



Situación 2:
ocupación
parcial



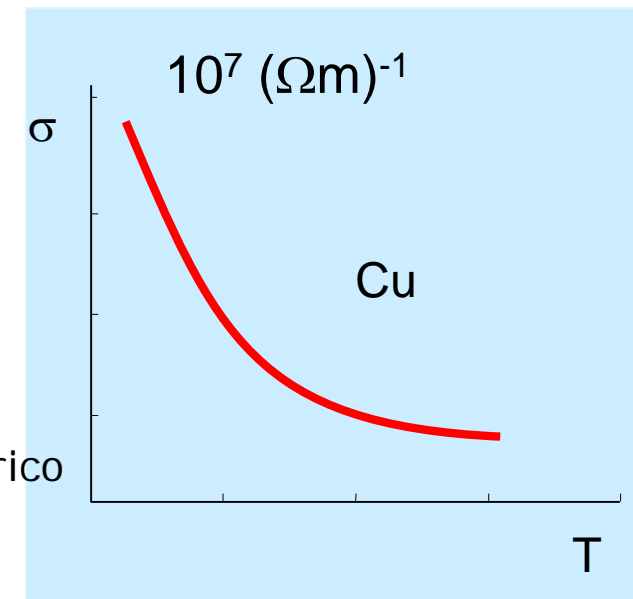
¿Qué pasa al aplicar un campo eléctrico?

los electrones tienen estados de energía superior próximos disponibles → pueden aumentar su **energía cinética** bajo un **campo eléctrico** aplicado
→ se produce **corriente eléctrica**

densidad de portadores $\sim 10^{23}$ electrones/cm³

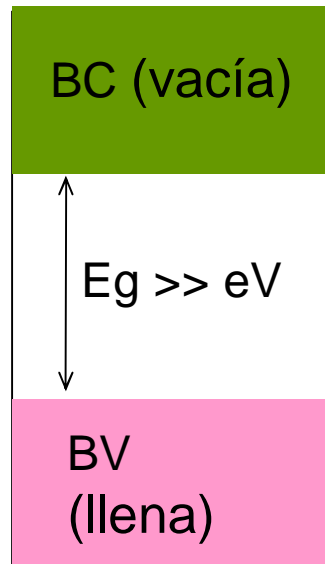
¿Qué pasa al aumentar la temperatura?

la banda de conducción se llena por **excitación térmica** → no quedan electrones que puedan absorber energía cinética debida al campo eléctrico aplicado → **disminuye la conductividad (σ)**



Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

•Modelo de bandas de energía. Aislante



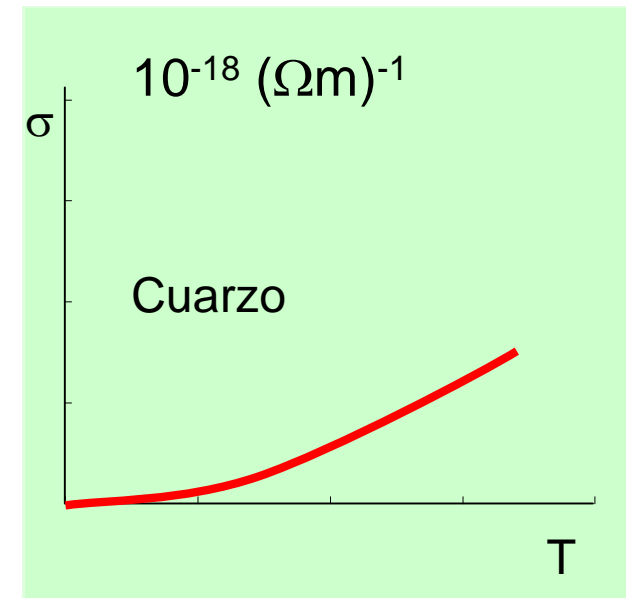
¿Qué pasa al aplicar un campo eléctrico?

los estados de energía superior se hallan separados por un "gap" muy grande → **no hay electrones térmicos en BC**; no pueden aumentar su energía cinética bajo un campo eléctrico aplicado → **no hay corriente eléctrica** (es despreciable)

densidad de portadores $\sim 10^7$ electrones/cm³

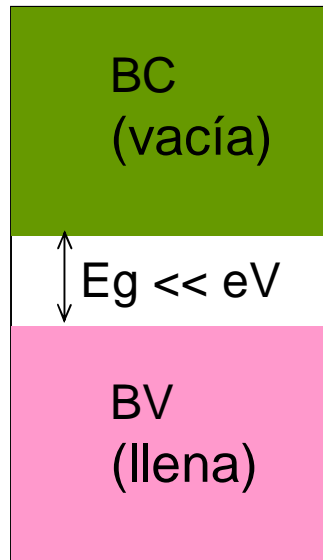
¿Qué pasa al aumentar la temperatura?

por excitación térmica saltan electrones desde BV hasta BC → hay electrones que pueden absorber energía cinética → **aumenta la conductividad (σ)**



Apéndice 1: Bandas de energía en sólidos cristalinos

• Modelo de bandas de energía. Semiconductor intrínseco



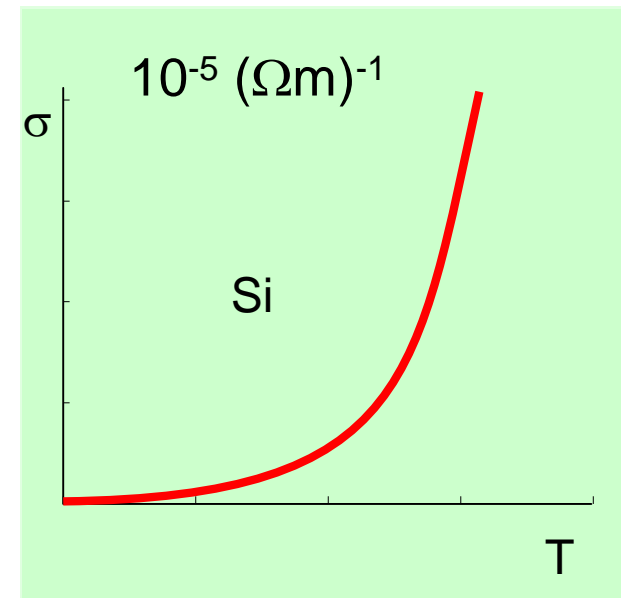
¿Qué pasa al aplicar un campo eléctrico?

los estados de energía superior se hallan separados por un "gap" pequeño \rightarrow hay electrones térmicos en BC (y huecos en BV); pueden aumentar su energía cinética bajo un campo eléctrico aplicado \rightarrow hay una pequeña corriente eléctrica

densidad de portadores (Si) $\sim 10^{10}$ electrones/cm³
densidad de portadores (Ge) $\sim 10^{13}$ electrones/cm³

¿Qué pasa al aumentar la temperatura?

por excitación térmica saltan electrones desde BV hasta BC \rightarrow hay electrones que pueden absorber energía cinética \rightarrow aumenta la conductividad (σ)



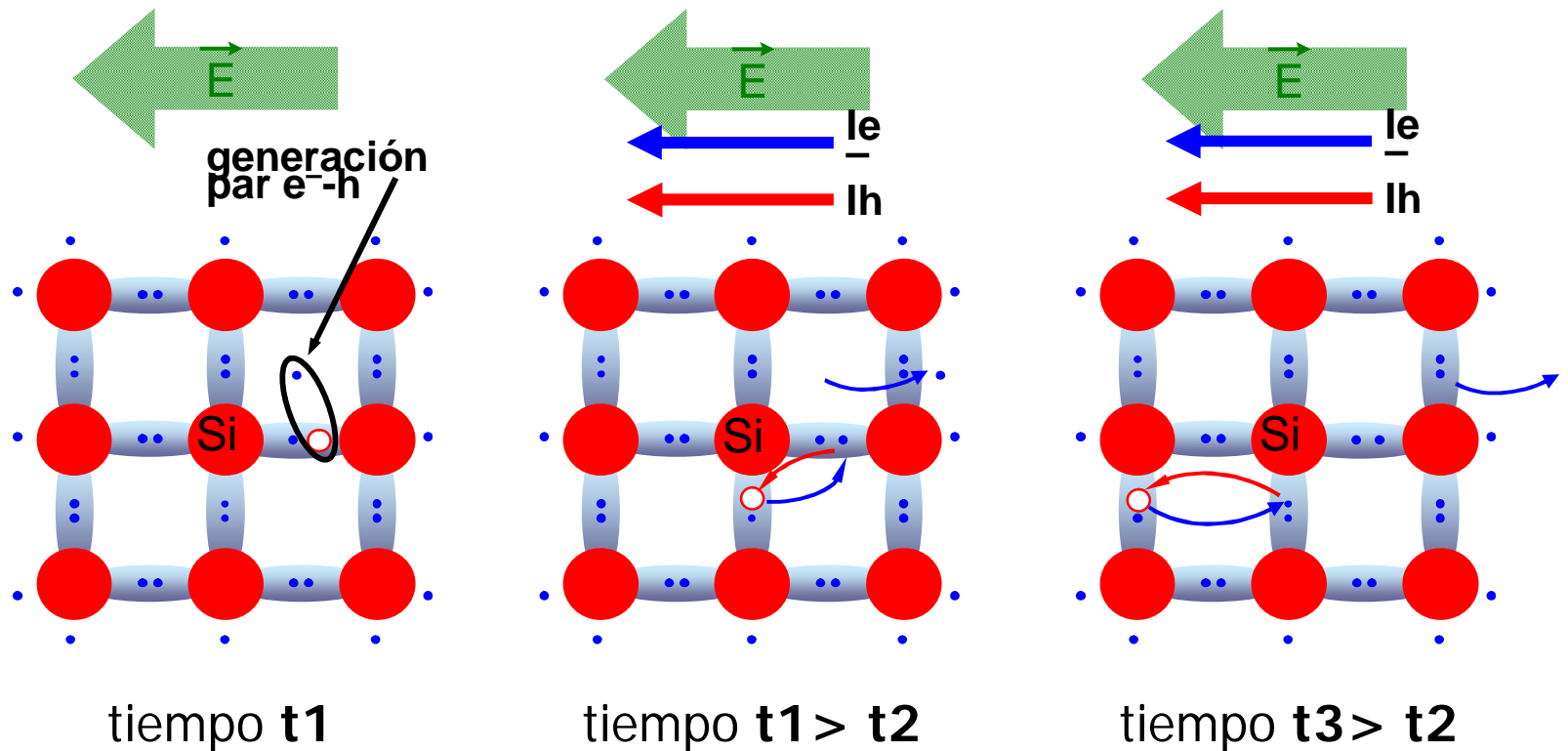
Materiales semiconductores: características

•Semiconductor intrínseco.

$^{14}\text{Silicio}$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
 $^{32}\text{Germanio}$: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$

último nivel semilleno \rightarrow enlace covalente: comparten electrones para tener última capa completa (8 electrones)

$T > 0 \text{ K}$



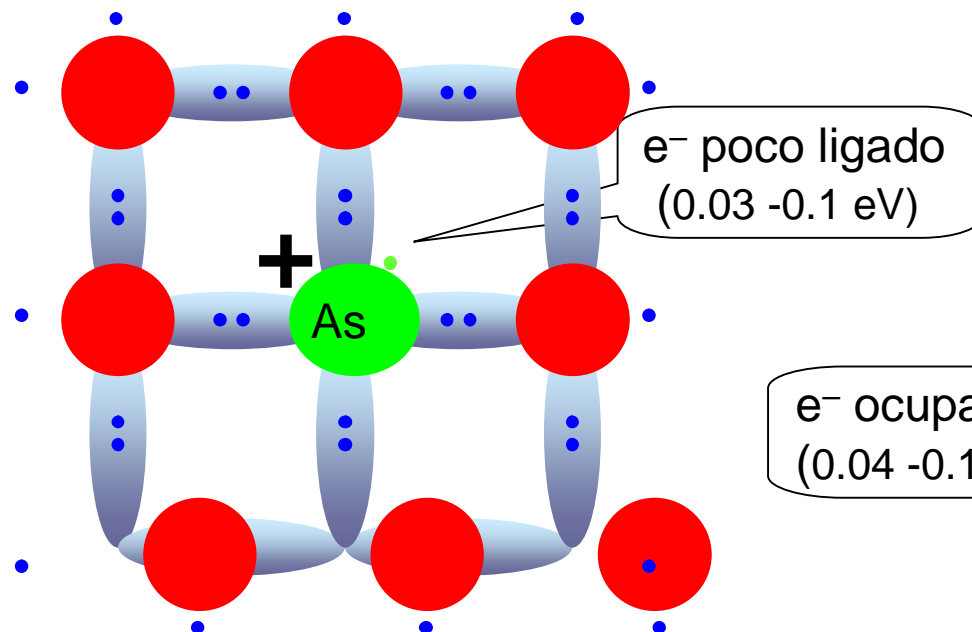
Materiales semiconductores: características

- **Semiconductor extrínseco.**

Se **dopa** el Si o el Ge con **impurezas** que añaden portadores de corriente.

Átomo donador P,As,Sb: (ND)
(5 e- en su última capa)

semiconductor **tipo n**

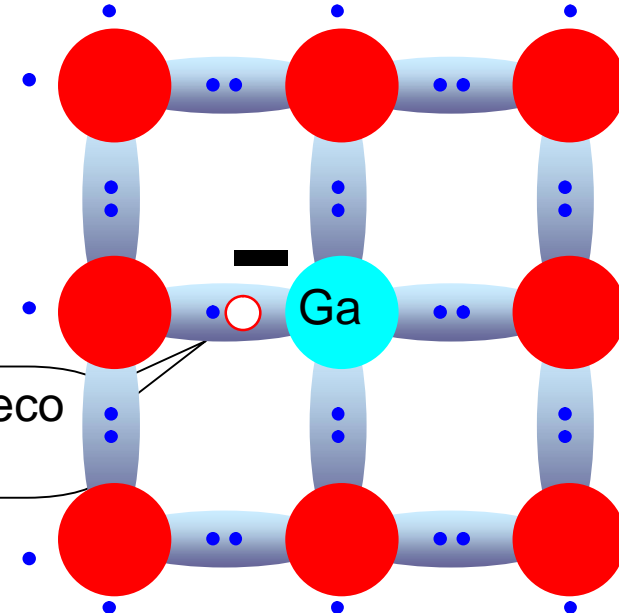


Portadores mayoritarios: $n \approx 10^{16}/\text{cm}^3$

Portadores minoritarios: $p \approx 10^{10}/\text{cm}^3$
(por excitación térmica)

Átomo aceptor B,Al,Ga,In: (NA)
(3 e- en su última capa)

semiconductor **tipo p**



Portadores mayoritarios: $p \approx 10^{16}/\text{cm}^3$

Portadores minoritarios: $n \approx 10^{10}/\text{cm}^3$
(por excitación térmica)

Materiales semiconductores: características

• Donadores y aceptores para el silicio

1 H 1,008												2 He 4,003	
3 Li 6,941	4 Be 9,012			5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,183				
11 Na 22,990	12 Mg 24,305			13 Al 26,982	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,064	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948				
19 K 39,10	20 Ca 40,08	...	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,91	36 Kr 83,80				
37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	...	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,89	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,90	54 Xe 131,30				
55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	...	80 Hg 200,59	81 Tl 204,37	82 Pb 207,19	83 Bi 208,98	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)				



Corrientes en semiconductores

En un semiconductor se presentan dos tipos de corriente eléctrica:

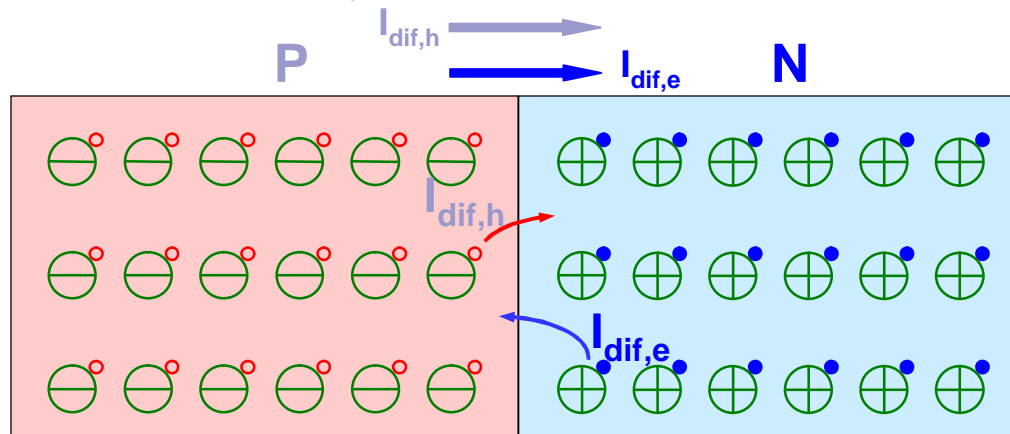
Corriente de arrastre: Producida por un campo eléctrico aplicado al material.

Es análoga a la que se produce en los materiales conductores salvo que en este caso hay dos tipos de portadores en movimiento: Electrones moviéndose en sentido contrario al campo y huecos en el mismo sentido. Ambos movimientos de carga contribuyen a crear una corriente en el sentido del campo aplicado.

Corriente de difusión: Se produce cuando en el volumen del material la concentración de portadores no es uniforme. Esto origina un movimiento de cargas en el semiconductor para buscar el equilibrio.

El diodo de unión

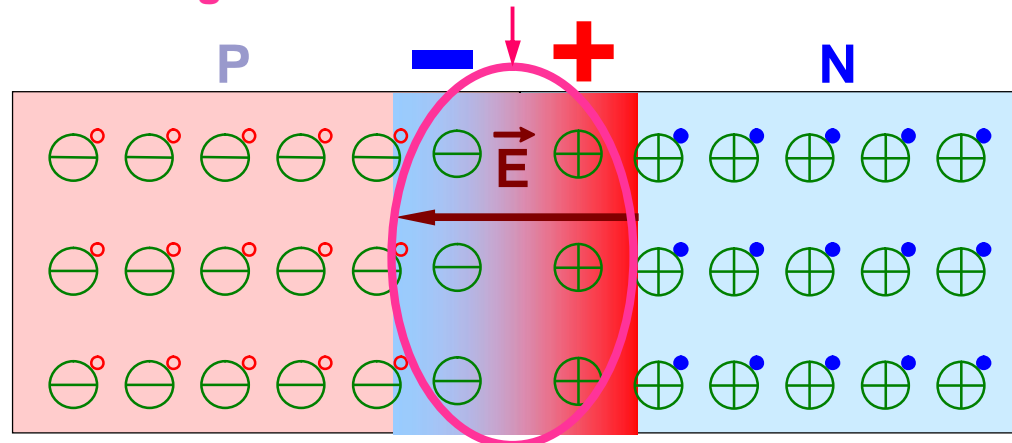
- **Unión p-n sin polarizar:** La *diferencia de concentraciones de electrones y huecos* produce **corrientes de difusión** que tiende a igualar las concentraciones → **electrones de N pasan hacia P y huecos de P pasan hacia N.**



$I_{dif,h} \equiv$ Corriente de difusión por huecos (+) de P a N

$I_{dif,e} \equiv$ Corriente de difusión por electrones (-) de N a P

- Debido a $I_{dif,h}$ e $I_{dif,e}$ “quedan al descubierto” las impurezas (iones) aceptoras y donadoras → **carga eléctrica en zona de transición** → **campo eléctrico** \vec{E}

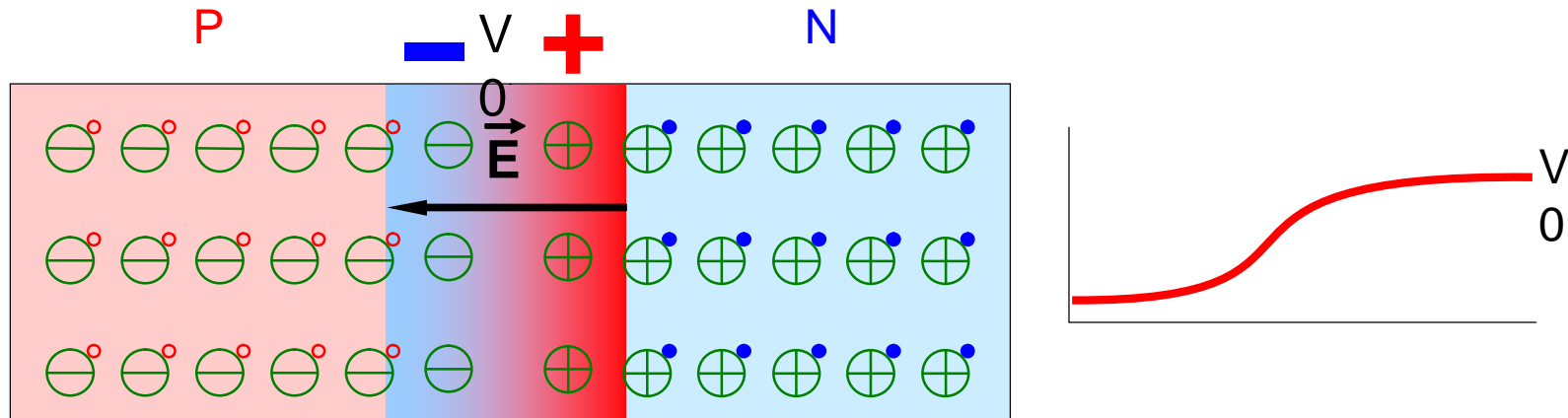


El campo eléctrico se opone a las corrientes de difusión llegando a un **EQUILIBRIO** en la separación de carga.

El diodo de unión

- Unión p-n sin polarizar.

Hay una diferencia de potencial entre las dos zonas de la unión.

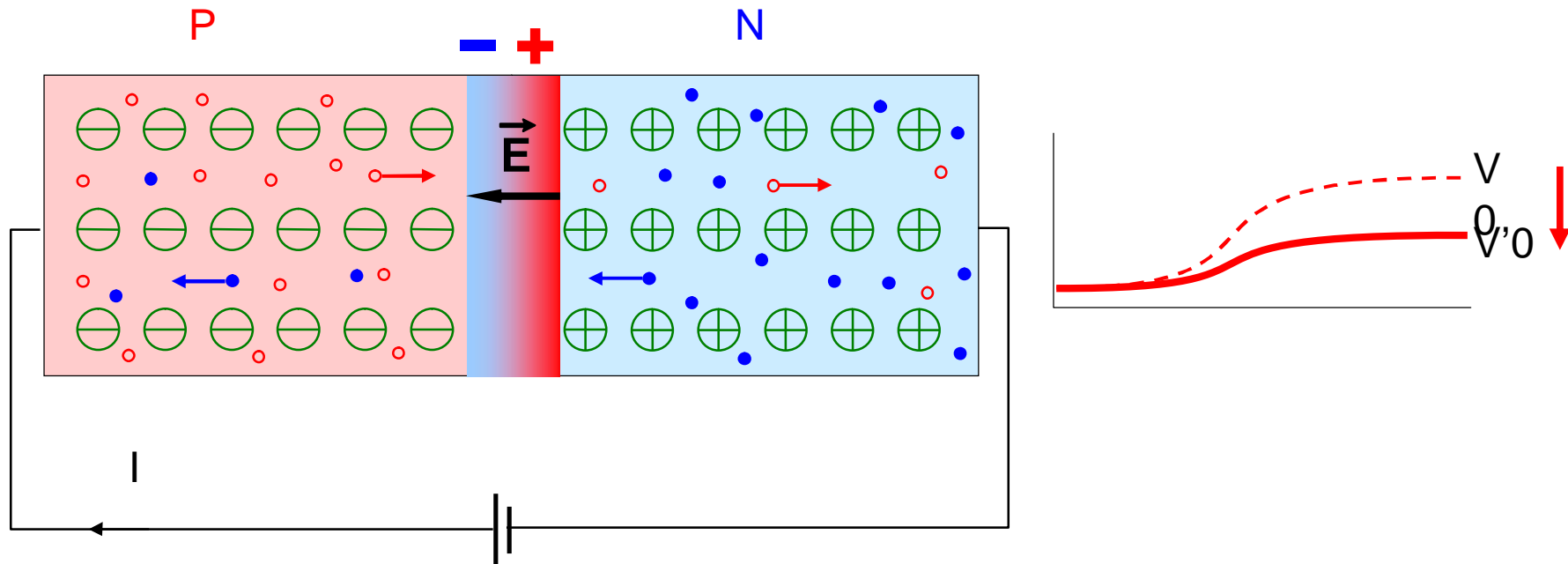


V_0 se llama **Potencial de contacto** y representa la diferencia de potencial entre los extremos de la zona de transición en **equilibrio**.

$V_0 = 0.7 \text{ V}$ para diodos de Si y $V_0 = 0.3 \text{ V}$ para diodos de Ge, a 20°C

El diodo de unión

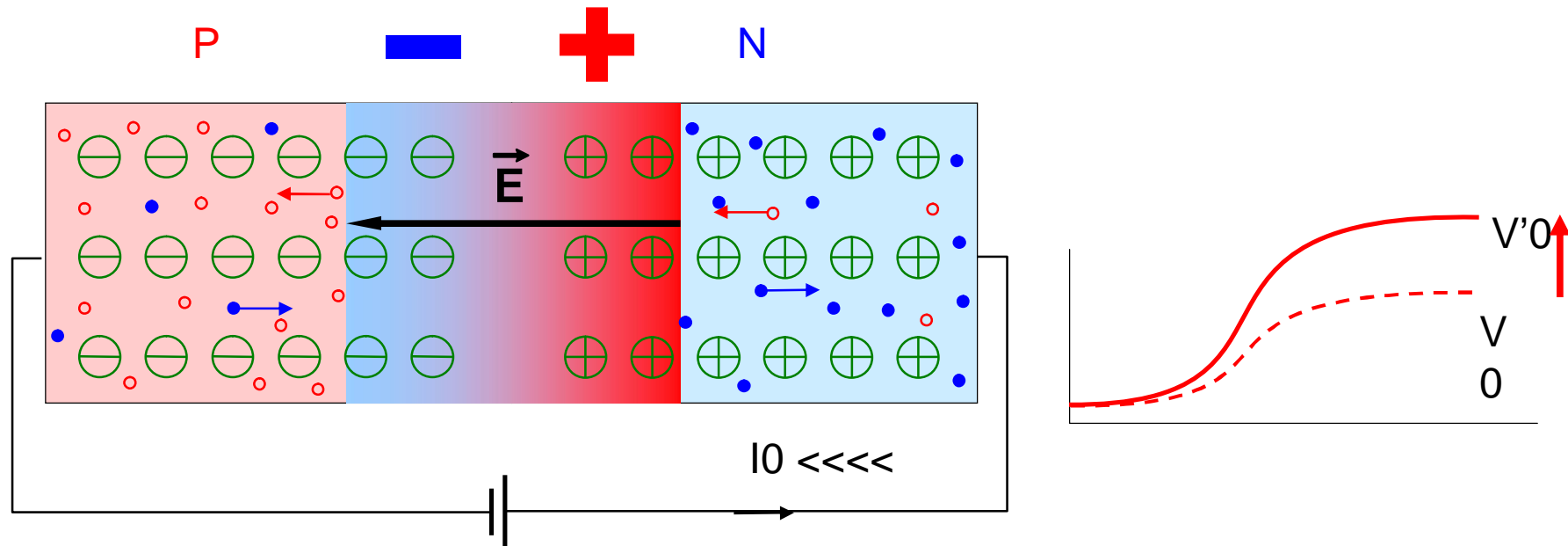
- Polarización directa.



La pila crea un campo eléctrico opuesto al de la unión, disminuye el E_{total} en la unión y la barrera de potencial, y **aumenta la corriente de mayoritarios** por difusión → **circula corriente cuando se supera la barrera de potencial (tensión umbral)**

El diodo de unión

•Polarización inversa.

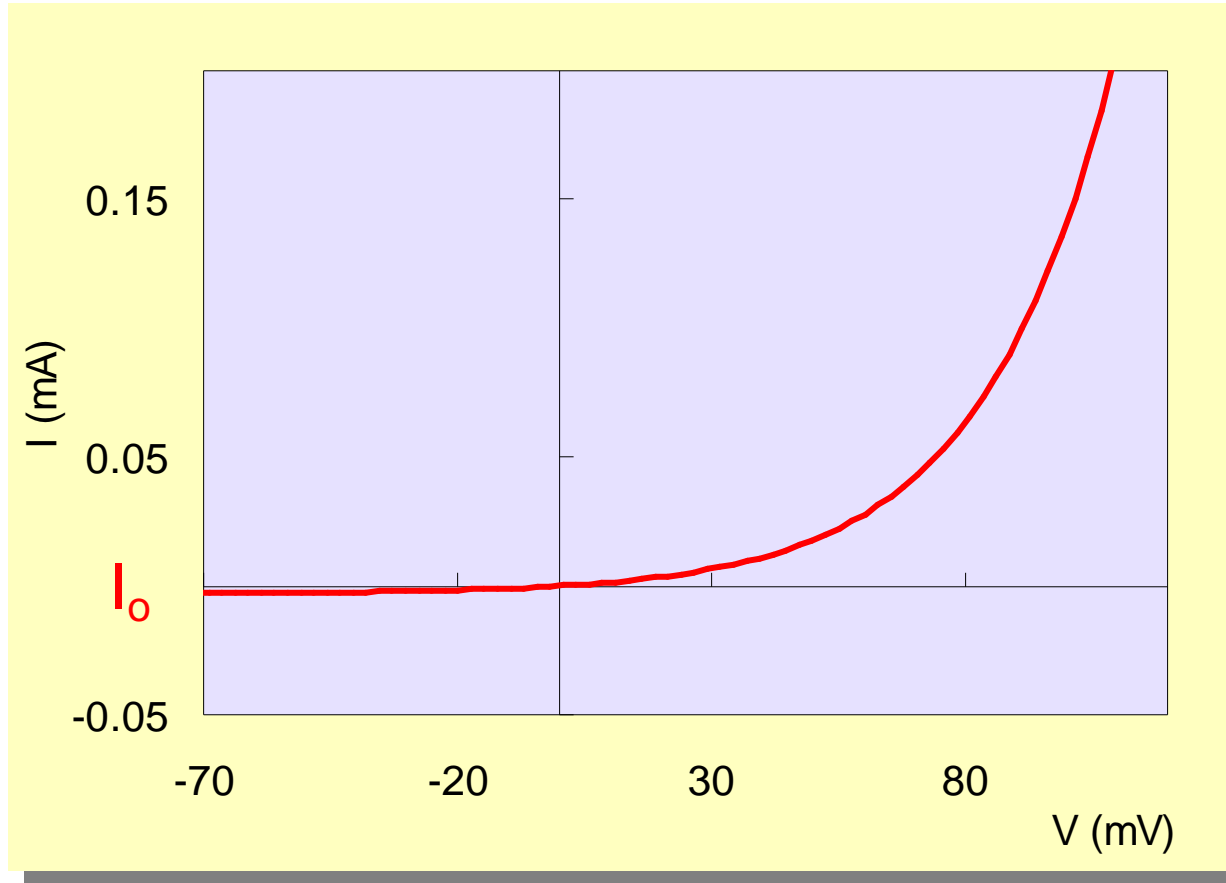


La pila crea un campo eléctrico en el mismo sentido que el de la unión, aumenta el E_{total} , aumenta la barrera de potencial $V'0$, y **disminuye la corriente de mayoritarios**.

Favorece el desplazamiento de huecos hacia la zona **p** y de e^- hacia la zona **n**, ensanchándose la zona de transición. Pero estos h^+ y e^- provienen de zonas donde son minoritarios. El resultado es que fluye una pequeña corriente I_0 , debida únicamente a los pares e^-h^+ que se generan por agitación térmica llamada **CORRIENTE INVERSA DE SATURACIÓN**.

El diodo de unión

- Curva característica.



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

$$V_T = \frac{kT}{q_e}$$

$V_T(300 \text{ K}) = 25.85 \text{ mV}$

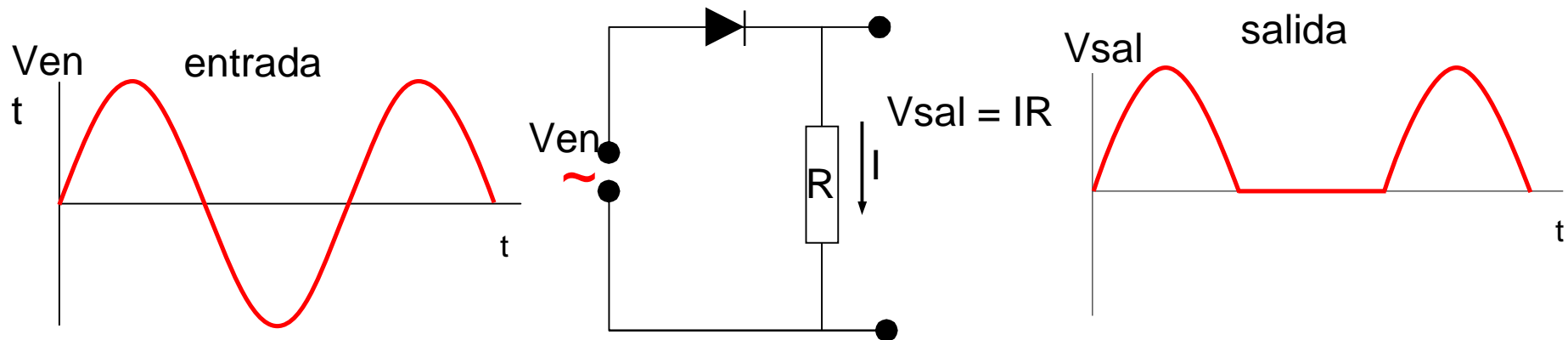
I_0 : Corriente inversa de saturación

k (Constante de Boltzmann) = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

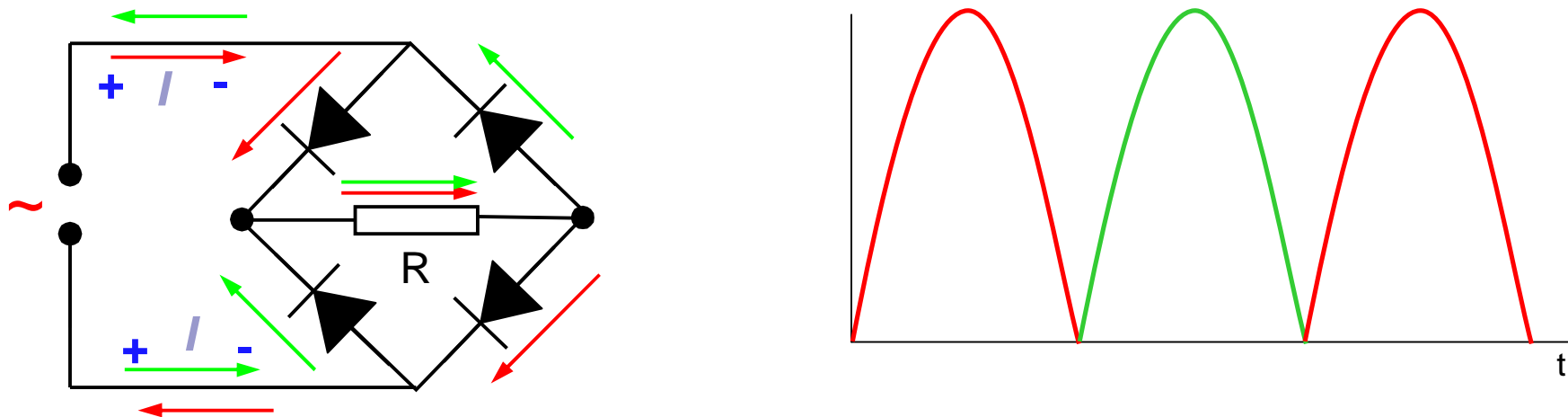
El diodo de unión

•El diodo como rectificador.

De media onda:



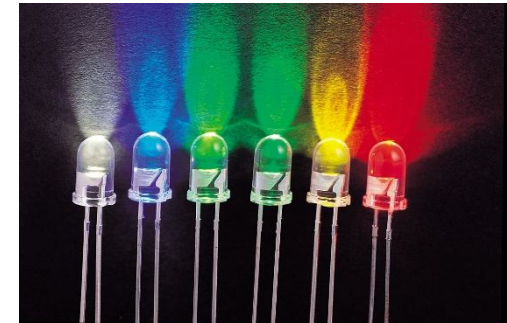
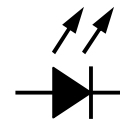
De onda completa



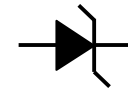
El diodo de unión

- Algunos tipos de diodos relevantes:

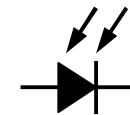
- **LED (Light Emitting Diode):** En *polarización directa*, las recombinaciones electrón-hueco liberan energía en fotones de luz → electroluminiscencia.



- **Zéner:** Aprovechan el fenómeno de *ruptura en polarización inversa*.



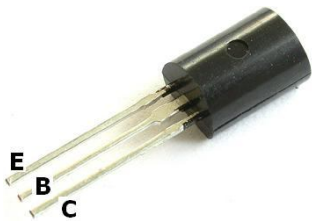
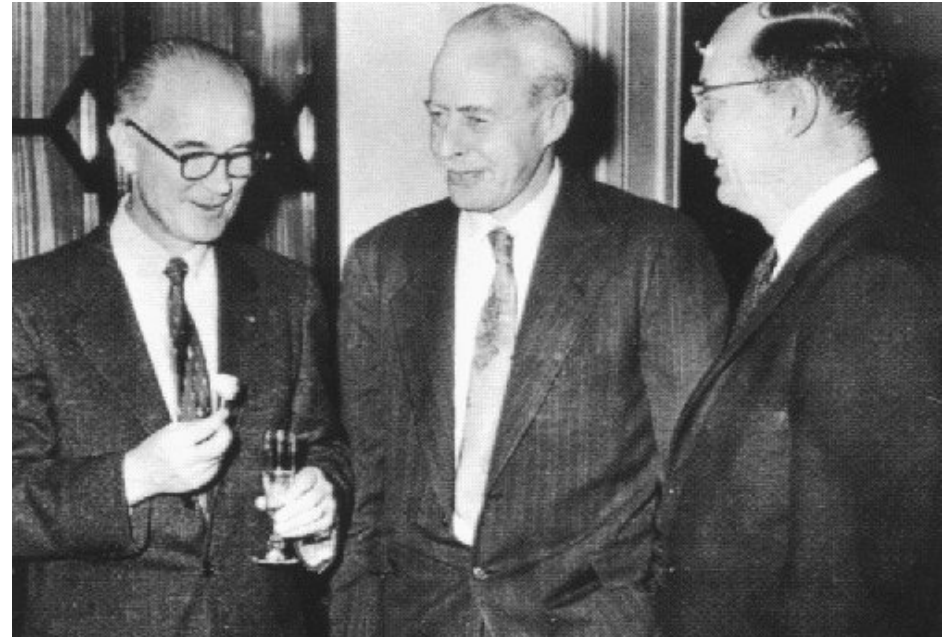
- **Fotodiodos:** En *polarización inversa*, los fotones de luz transfieren energía generando pares electrón-hueco → aumento de portadores → fotocorriente.



El transistor de unión

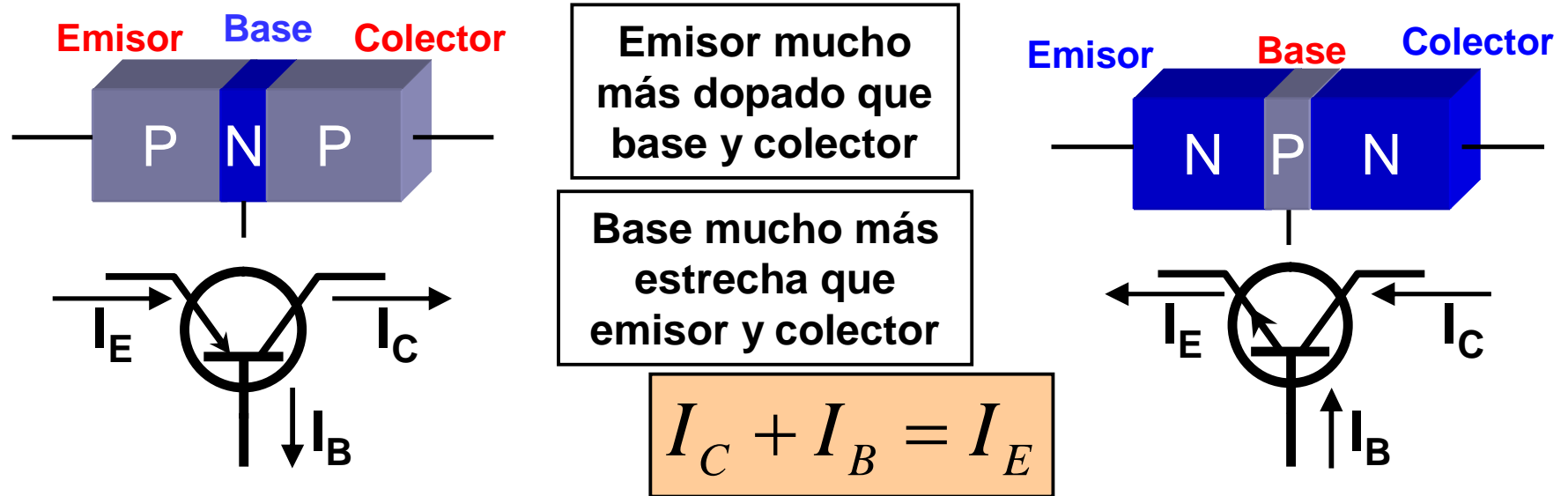
- **Importancia histórica.**

En 1949, Walter Houser Brattain, John Bardeen y William Bradford Shockley, científicos de la "Bell Telephone Laboratories", iniciaron una revolución en la electrónica con la invención del transistor. En 1956 recibieron el premio Nobel de Física por su trabajo.



El transistor de unión

- Transistor BJT: Dispositivo semiconductor en el que una fina capa n está entre dos capas p (p-n-p) o una fina capa p está entre dos capas n (n-p-n).

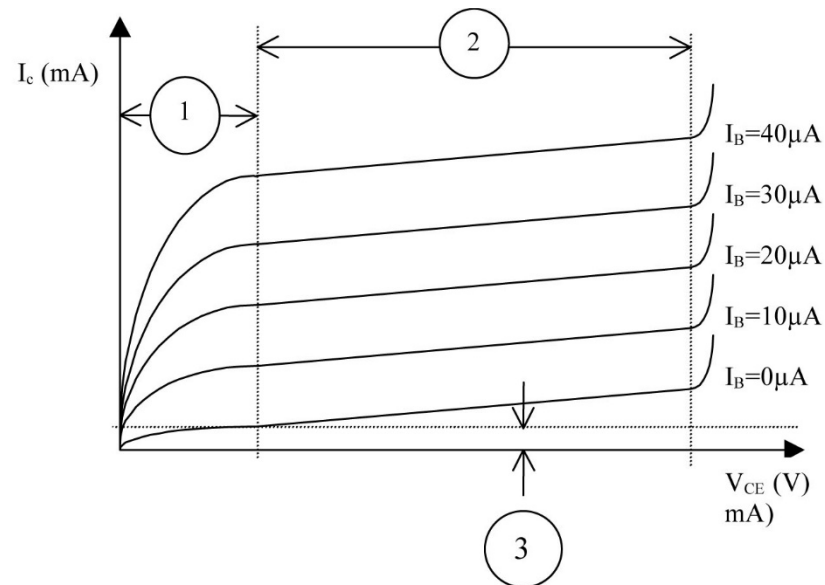


Tipos de transistores (entre otros):

- **Transistor bipolar de unión:** Bipolar Junction Transistor (BJT).
- **Transistor de efecto de campo de unión:** Junction Field Effect Transistor (JFET)
- **Transistor de efecto de campo de metal-óxido** → Metal Oxide Field Effect Transistor (MOSFET).

El transistor de unión

Representación de la intensidad de colector I_C frente a V_{CE} para distintas corrientes de base I_B



CARACTERISTICAS DE SALIDA DEL TRANSISTOR

• **Amplificadores analógicos, región activa (2):**
una pequeña corriente de base I_B puede controlar corrientes de colector I_C mucho mayores

- 1 Región de saturación
- 2 Región activa
- 3 Región de corte

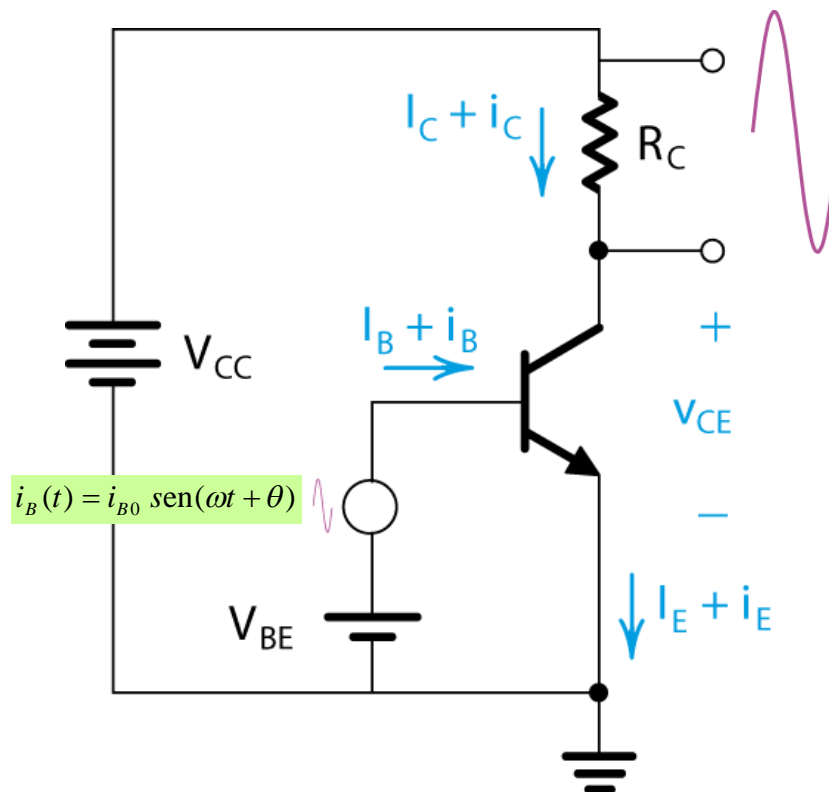
• Conmutadores

R. Saturación (1): la tensión entre colector y emisor es $\sim 0\text{ V} \rightarrow$ aprox. cortocircuito entre colector y emisor

R. Corte (3): $I_E \sim 0$, $I_C \sim 0$ e $I_B \sim 0 \rightarrow$ aprox. circuito abierto entre colector y emisor

El transistor de unión

- **Transistor BJT como amplificador:** dispositivo que aumenta una señal de entrada sin modificar su forma de onda.



Valores típicos de ganancia en BJT

$$50 \leq \beta \leq 300$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$I_E \approx I_C \gg I_B$$

- En este ejemplo simple la señal de salida será la componente de continua más la de alterna superpuesta. Utilizando condensadores en serie en la entrada (I_B) y la salida (I_C) se puede eliminar la componente continua de la señal.



PUERTA LÓGICA

- Es un dispositivo electrónico con una función booleana
- <https://www.geogebra.org/m/Ke6p4knT>

El transistor de unión

- Ejemplo de aplicación en electrónica digital: **PUERTAS LÓGICAS**

Emisor E conectado a toma de tierra (0 Voltios).

V_{AE} : Entrada; V_{CE} : Salida

- “1” lógico \rightarrow tensión alta (> 2.5 V)
- “0” lógico \rightarrow tensión baja (< 0.5 V)

PUERTA NOT

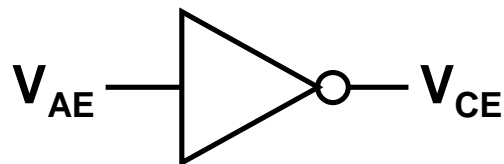
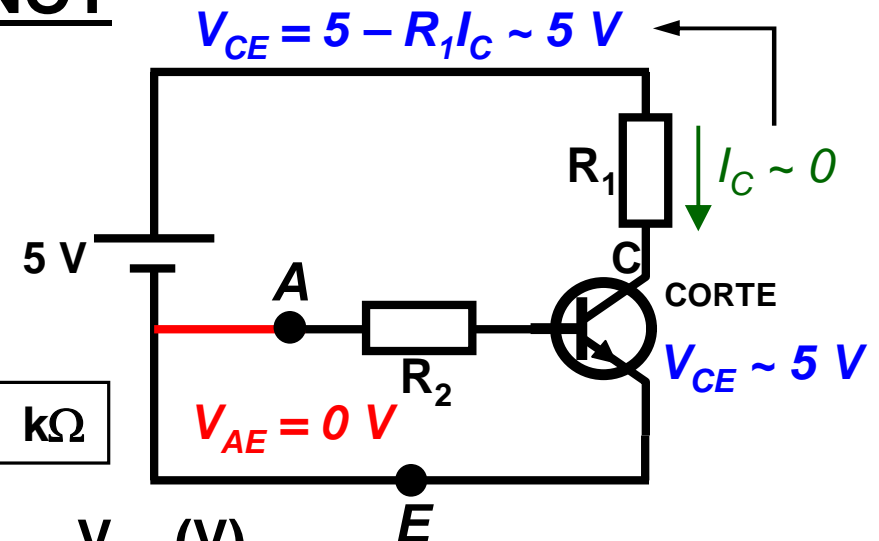
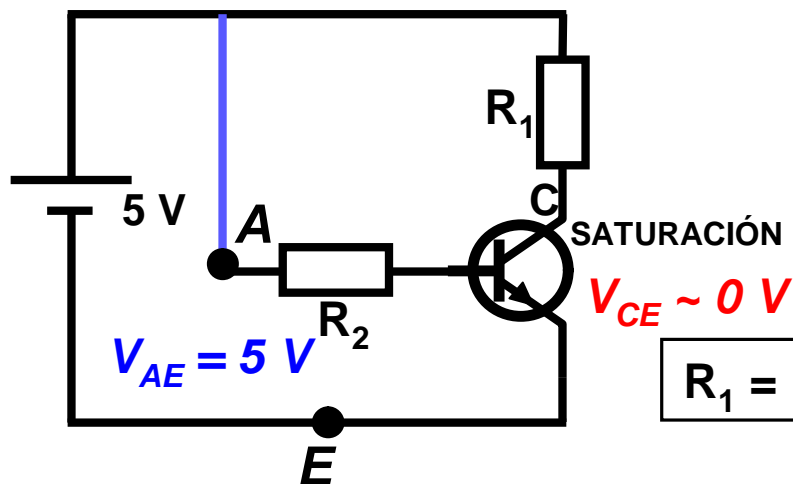
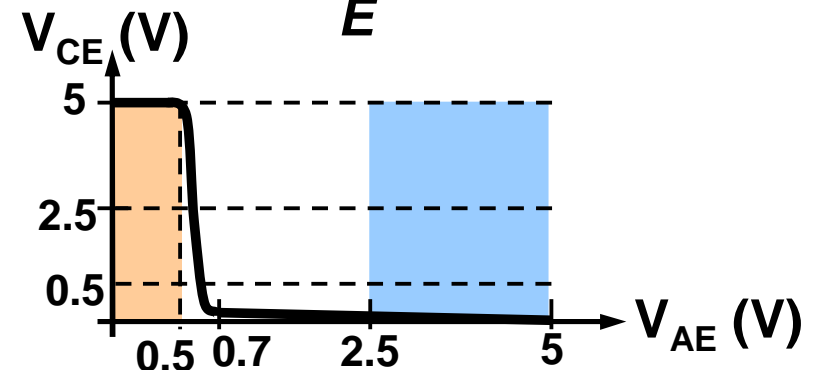


TABLA DE VERDAD NOT

V_{AE}	V_{CE}
1	0
0	1



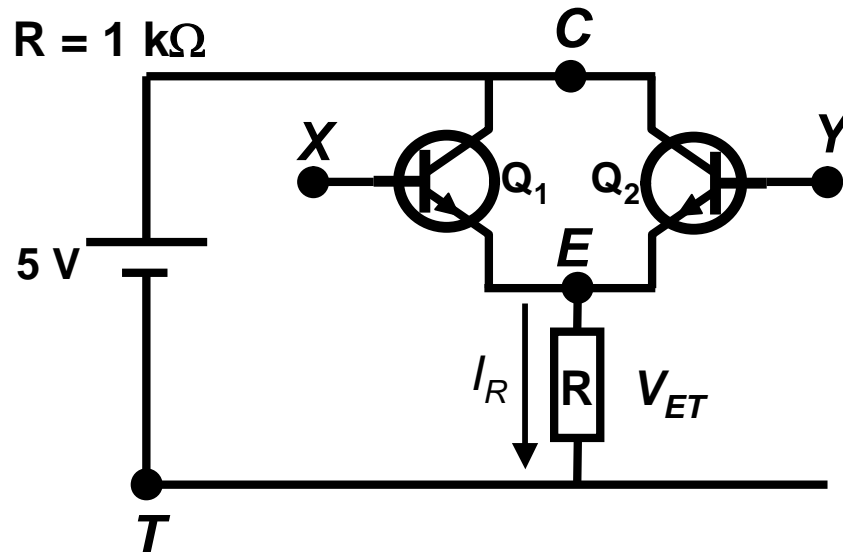
El transistor de unión

- **PUERTA OR:** con punto T (toma de tierra) común a entradas y salida

$X, Y \equiv$ Entradas

$E \equiv$ Salida (emisor común)

$C \equiv$ Colector común



Si $V_{XT} = 5 \text{ V} \rightarrow V_{XE} \sim 0.7 \text{ V}$ y $V_{XC} = 0 \text{ V}$ (Q_1 activo) $\rightarrow V_{ET} = V_{XT} - V_{XE} \sim 4.3 \text{ V}$

Si $V_{YT} = 5 \text{ V} \rightarrow V_{YE} \sim 0.7 \text{ V}$ y $V_{YC} = 0 \text{ V}$ (Q_2 activo) $\rightarrow V_{ET} = V_{YT} - V_{YE} \sim 4.3 \text{ V}$

Si $V_{XT} = V_{YT} = 0 \text{ V} \rightarrow Q_1$ y Q_2 en corte $\rightarrow I_R \sim 0 \rightarrow V_{ET} = R \cdot I_R \sim 0 \text{ V}$

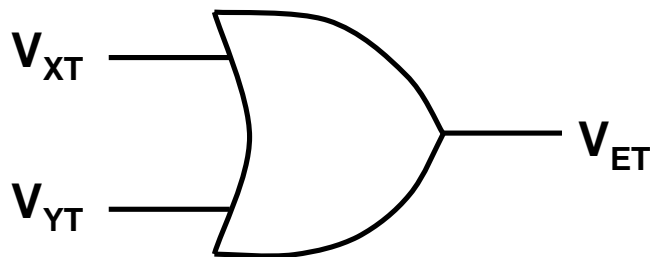


TABLA DE VERDAD OR

V_{XT}	V_{YT}	V_{ET}
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

La salida "1" lógico pierde $\sim 0.7 \text{ V}$ por la unión base-emisor en directa \rightarrow solución con **seguidores**

El transistor de unión

- **SEGUIDOR**: Dispositivo que a la salida proporciona a el mismo nivel lógico que a la entrada pero *regenerando* la tensiones a los valores 0 V y 5 V .

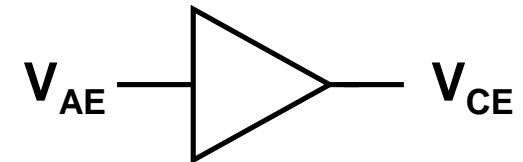
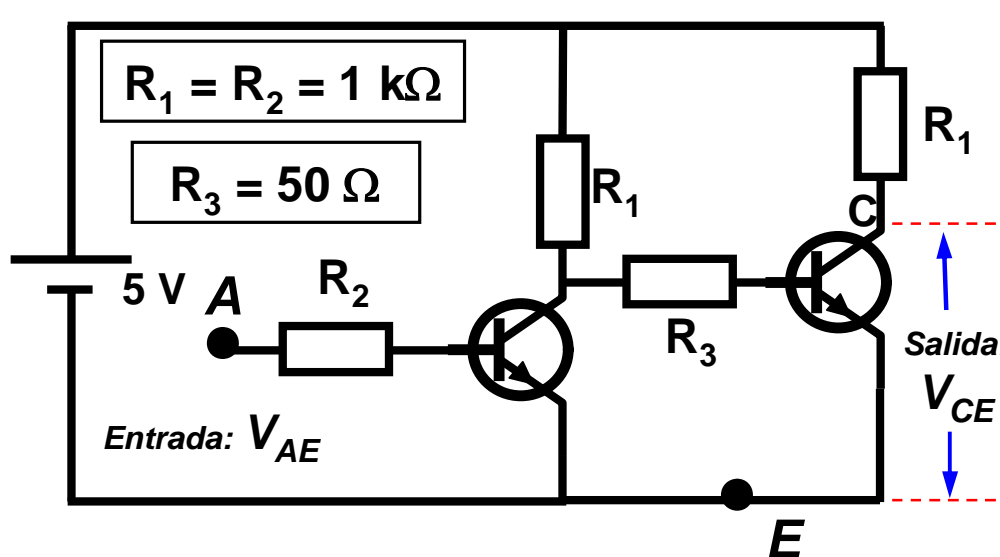
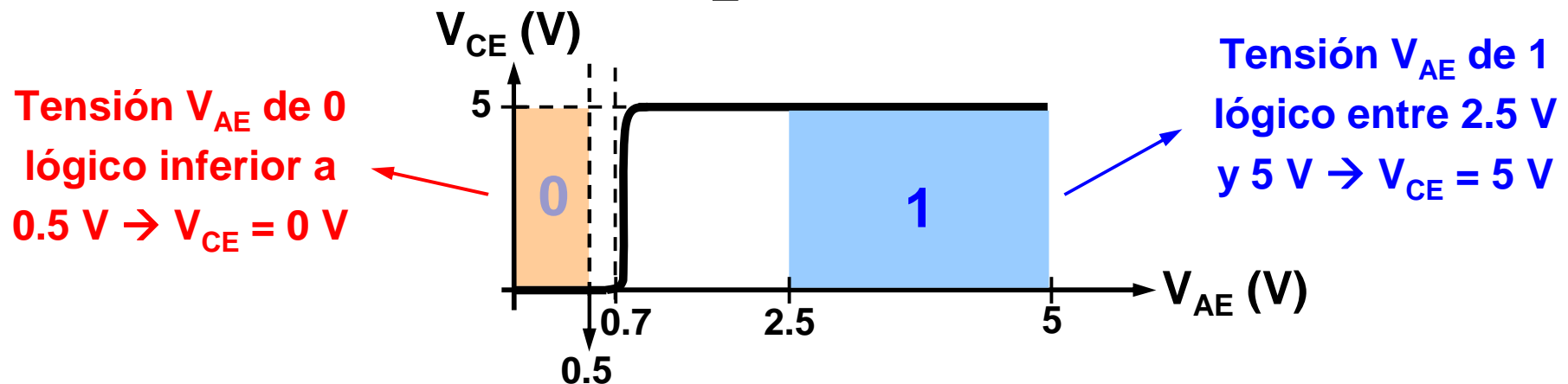


TABLA DE VERDAD SEGUIDOR

V_{AE}	V_{CE}
1	1
0	0



El transistor de unión

- **OTRAS PUERTAS:** Cualquier puerta lógica se puede realizar mediante puertas OR y NOT (álgebra de Boole).

PUERTA AND

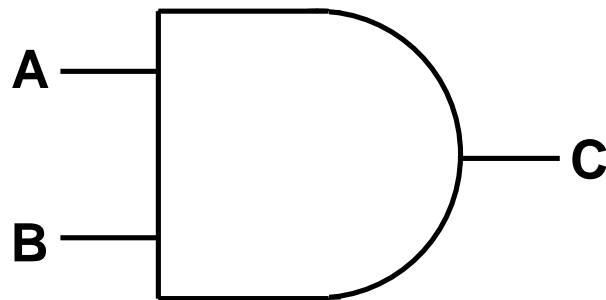
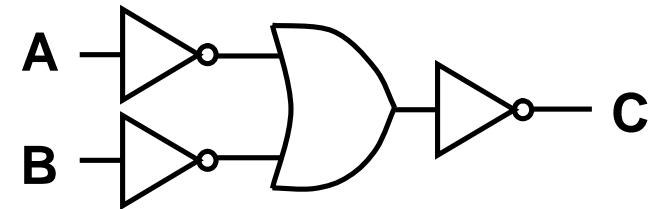


TABLA DE VERDAD AND

A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

PUERTA AND MEDIANTE OR y NOT



PUERTA XOR

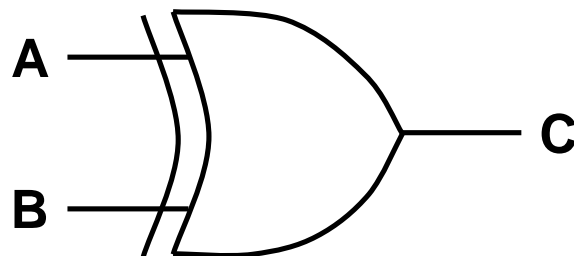
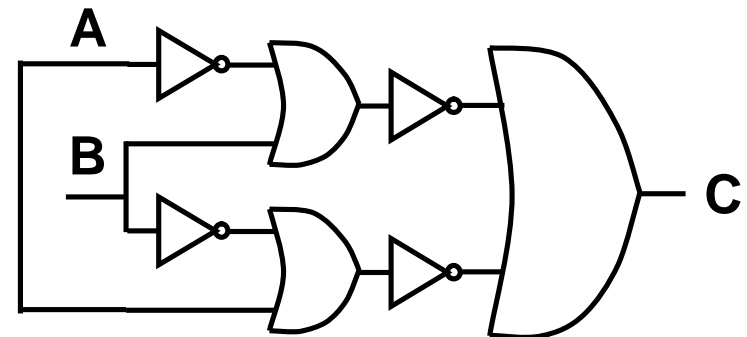


TABLA DE VERDAD XOR

A	B	C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

PUERTA XOR MEDIANTE OR y NOT





Apéndice 2: Materiales superconductores

- La dependencia de la resistividad de los metales con la temperatura deja de ser lineal para temperaturas inferiores a unos 20° K
- A bajas temperaturas la resistividad de un metal depende de la cantidad de impurezas que contenga (la medida de resistividad a bajas temperaturas se utiliza para determinar la cantidad de impurezas que contiene un metal)
- Existen sustancias conductoras cuyas propiedades eléctricas cambian drásticamente cuando su temperatura baja más allá de una determinada temperatura, denominada **temperatura crítica T_C** , característica de cada sustancia



Apéndice 2: Materiales superconductores

- Por debajo de la temperatura crítica el material se transforma en un **superconductor**. En un superconductor, la corriente eléctrica fluye sin resistencia por lo que no se producen pérdidas calóricas por efecto Joule.
- La mayoría de metales que presentan este fenómeno tienen una temperatura crítica por debajo de los 10^0 K
 - $\text{Al} \cong 1,2^{\circ} \text{K}$;
 - $\text{Hg} \cong 4^{\circ} \text{K}$;
 - $\text{Pb} \cong 7,2^{\circ} \text{K}$;



Apéndice 2: Materiales superconductores

- Se ha observado el fenómeno de superconductividad en materiales cerámicos, como el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, que presentan temperaturas críticas por encima de los 77° K ([temperatura de ebullición del nitrógeno](#))
- Estos materiales abren grandes perspectivas en aplicaciones tecnológicas debido al bajo coste del nitrógeno líquido que se utiliza como refrigerante.

<http://www.microsiervos.com/archivo/ciencia/efecto-meissner-levitacion-cuantica.html>