Tema 1: Campo eléctrico

1. Electrostática (estudio interacciones entre cargas en reposo)

- Carga eléctrica ⟹ unidad → Culombio (C)

+ Protón ⟶ $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
+ Electrón ⟶ $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
+ Neutrón ⟶ 0 C

Propiedades:
1º Polaridad: positiva y negativa
2º Cantidad de carga en el universo es cte
3º Naturaleza discreta o cuantizada

→ Cargas puntuales: carga contenida en un punto geométrico carente de toda dimensión // dos cuerpos con carga muy pequeños en comparación con la distancia que los separa.

→ Cargas no puntuales

Densidad lineal de cargas ⟹ $\lambda = \frac{Q}{l}$

Densidad superficial de cargas ⟹ $\sigma = \frac{Q}{S}$

Densidad cúbica de carga ⟹ $\rho = \frac{Q}{V}$

→ Cargas libres y ligadas

→ Corriente eléctrica: movimiento colectivo de un nº significativo de cargas libres

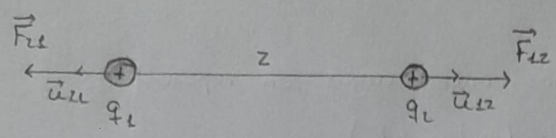
2. Ley de Coulomb

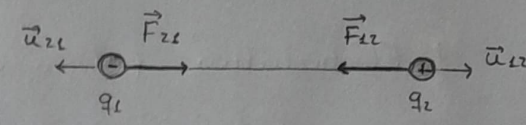
- Fuerza eléctrica ⟹ directamente proporcional al producto de las cargas
  inversamente proporcional al cuadrado de dicha distancia
  dirección recta que une las cargas

$$\vec{F_e} = k_0 \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}$$

$k_0 = 9 \cdot 10^9 \ Nm^2/C^2$

F. eléctrica <u>repulsiva</u> F. eléctrica <u>atractiva</u>





- Principio de superposición $\Rightarrow$ fuerza que ejercen varias cargas puntuales sobre otra

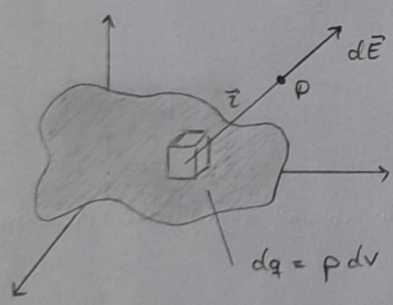
3. Campo eléctrico (región espacio carga sufre una f. eléctrica)

- Campo eléctrico creado por una carga puntual

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_1} = \frac{k\frac{q\,q'}{r^2}}{q'}\vec{u}_r = k\frac{q}{r^2} \qquad (N/C)$$

+ Propiedades:
  1. $\vec{F} = q\vec{E}$
  2. Principio de superposición

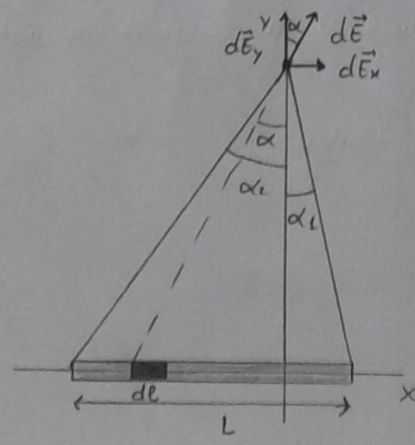
- Campo eléctrico creado por distribuciones continuas de carga



$$\vec{E} = \int_V d\vec{E} \rightarrow d\vec{E} = k_0\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r \rightarrow$$

$$\vec{E} = \int_V k_0\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r \rightarrow \begin{cases} dq = \lambda\, dl \\ dq = \sigma\, dS \\ dq = \rho\, dV \end{cases}$$

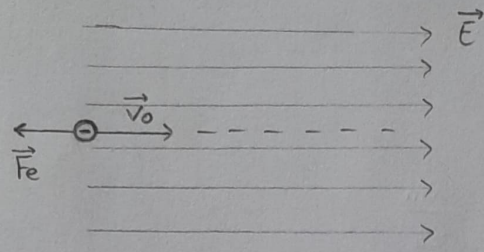
- Campo eléctrico creado por una distribución lineal de carga



$$\vec{E} = k_0\frac{\lambda}{a}\left[(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)i + (\operatorname{sen}\alpha_1 + \operatorname{sen}\alpha_2)j\right]$$

- Líneas de campo. (trayectoria seguiría carga ⊕ dejada libremente en el campo eléctrico)

- Mov. partículas cargadas en un campo eléctrico uniforme.

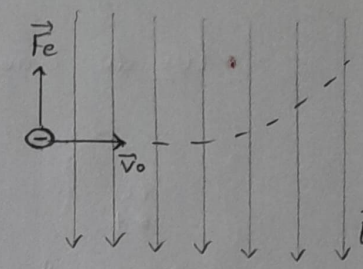


2ª ley de Newton

$\vec{F} = m\vec{a}$

$\vec{F_e} = q\vec{E}$

$$\boxed{\vec{a} = \frac{q}{m}\vec{E}}$$



↓

- $x = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} a t^2$
- $v = v_0 - a \cdot t$

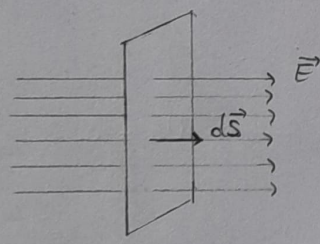
↓

- $y = \frac{1}{2} a t^2$
- $x = v_0 t \longrightarrow t = \frac{x}{v_0}$

$$y = d = \frac{1}{2} \frac{|q|E}{m} \cdot \frac{x^2}{v_0^2}$$

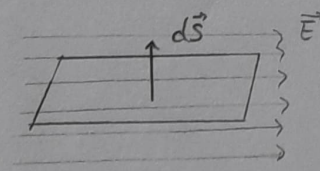
4. Flujo eléctrico y ley de Gauss

- Flujo elec. ⇒ nº de líneas de campo eléctrico que atraviesan una superficie

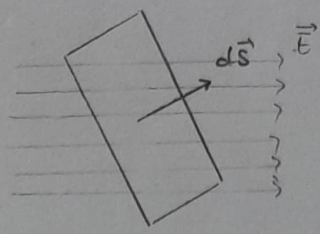


$$\boxed{\Phi_E = E \cdot S}$$

Un ⇒ $\frac{N}{C} m^2$



$$\boxed{\Phi_E = 0}$$

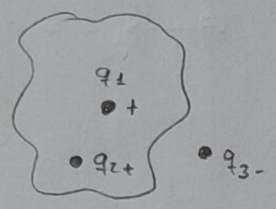


$$\boxed{\Phi_E = \int \vec{E} \cdot \vec{S} = E \cdot S \cdot \cos\alpha}$$

Flujo a través de una superficie (campo no uniforme)

$$d\Phi_E = \vec{E}\cdot d\vec{S} \Longrightarrow \Phi_E = \iint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \iint_S E\cdot\cos\alpha\cdot dS$$

- Ley de Gauss $\Rightarrow$ superficie cerrada



$$\Phi_{neto} = \oiint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{Q_m}{\varepsilon_0}$$

$$\Phi_{neto} = \frac{q_1 + q_2}{\varepsilon_0}$$

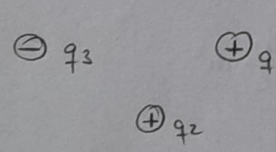
5 Energía potencial electrostática y potencial eléctrico

$F_e \Rightarrow$ fuerza conservativa $\longrightarrow$ Energ. potencial

$\boxed{\text{Trabajo}} \Longrightarrow W(A\to B) = -\Delta U = U_A - U_B$

- Energía potencial de una carga q' en un punto del campo creado por otra carga puntual q.

$W(A\to\infty) = \boxed{U = k_0\frac{qq'}{r}}$ $\qquad r_B = \infty \longrightarrow U_B = 0$



$$U = k_0\left(\frac{q_1q_2}{r_{12}} + \frac{q_1q_3}{r_{13}} + \frac{q_2q_3}{r_{23}}\right)$$

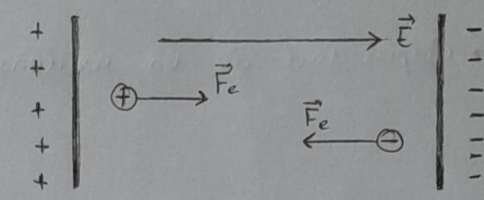
- Potencial eléctrico

$\boxed{W = -q\Delta V}$ $\qquad \boxed{V = \frac{U}{q'} = k_0\frac{q}{r}}$ $\qquad$ (J/C ó V)

¡Principio de superposición! $\Longrightarrow V_T = V_1 + V_2$

• Una partícula con carga q' dentro de un campo eléctrico que solo está sometida a la acción de la fuerza eléctrica FE.

"El campo eléctrico apunta hacia potenciales decrecientes"



$\vec{F_t} = \vec{F_e} + \vec{F_{ext}} \Longrightarrow W_t = \Delta E_c$

$\vec{F_e} = q\vec{E} \Longrightarrow W_e = -\Delta U = -\Delta E_p$

$\vec{F_{ext}} = \vec{F_t} - \vec{F_e} \Longrightarrow W_{ext} = \Delta E_c + \Delta U$

• Superficies equipotenciales (lugar geométrico puntos con mismo potencial)

6. Conductor en equilibrio electrostático (carga en reposo) $\Rightarrow \boxed{V_1 = V_2}$

• Características:

→ $\boxed{E = 0}$ (cualquier punto del interior del conductor)

→ Exceso de $\boxed{\text{carga en la superficie}}$

→ $\boxed{E_{ext} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}}$ E perpendicular a la superficie

→ $\boxed{\text{Volumen equipotencial}}$

• Capacidad de un conductor $\Longrightarrow C = \frac{Q}{V}$ (Faradio, F)

+ C. esfera metálica → $\boxed{C = 4\pi\varepsilon_0 r}$

$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$

7. Condensadores (conductores iguales y próximos)

reciben cargas iguales y opuestas

- Capacidad de un condensador $\Longrightarrow$ $\boxed{C = \frac{Q_+}{V_+ - V_-} = \frac{Q_-}{V_- - V_+}}$

$1\,F = 1\,C/V$

- Capacidad condensador plano $\rightarrow$ $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$; $\boxed{C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}}$

- Capacidad condensador esférico $\rightarrow$ $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$; $\boxed{C = \frac{R_1 \cdot R_2}{k_0 (R_2 - R_1)}}$

- Asociación de condensadores

⊕ En serie

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$\rightarrow Q_1 = Q_2 = Q_T$

$\rightarrow V_1 = \frac{Q}{C_1}$, $V_2 = \frac{Q}{C_2}$

⊕ En paralelo

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

$\rightarrow V_1 = V_2 = V_{eq}$

$\rightarrow Q_1 + Q_2 = Q_{eq}$

⊕ Asoc. mixta

$\rightarrow$ Asociar los iguales 8 en serie con en serie / en paral. con en paral. = resultado + lo que quede

- Energía electrostática almacenada en un condensador

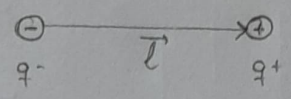
$$U = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q(V_A - V_B)}{2} = \boxed{\frac{1}{2} C (V_A - V_B)^2}$$

- Densidad de energía eléctrica $\boxed{\eta_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2}$

8. Condensadores con dieléctricos

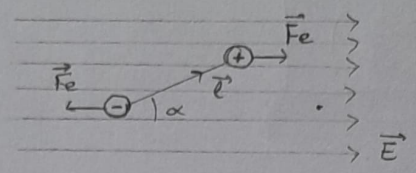
• Dipolos eléctricos con campos eléctricos

Dipolo $\Longrightarrow$



Vector momento dipolar $\Longrightarrow$ $\boxed{\vec{p} = q\vec{l}}$

Campo uniforme:



$$\boxed{\tau = \vec{p} \times \vec{E} = pE\,\text{sen}\,\alpha}$$

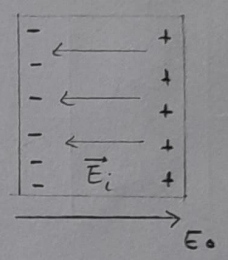
$\alpha = 0° \longrightarrow \tau = 0$

$\alpha = 90° \longrightarrow \tau = pE$

① Meto un aislante en un c.e

② Se produce una redistribución de carga

③ Se debilita el campo // disminución campo interior



• Influencia del dieléctrico sobre el condensador

→ Aumenta capacidad

→ Soporte de separación entre armaduras

→ Aumenta resistencia a la ruptura del condensador

$$\boxed{C = C_0 \cdot \varepsilon_r}$$

• Dieléctricos en el interior de un condensador

$\boxed{\text{Exterior}} \longrightarrow E_0 = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$ $\qquad$ $\boxed{\text{Interior}} \longrightarrow E_i = \dfrac{\sigma_i}{\varepsilon_0}$

$$E = E_0 + E_i$$

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

Permitividad dieléctrica relativa $\Longrightarrow$ $\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

(*) Aire $\varepsilon_r = 1$

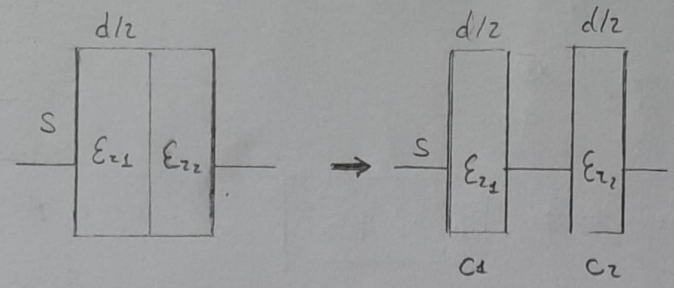
$$\boxed{E_i = \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r}\right) E_0} \qquad \boxed{\sigma_i = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon_r}\,\sigma}$$

- Condensadores con dos dieléctricos

capacidad cond. plano

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

1º



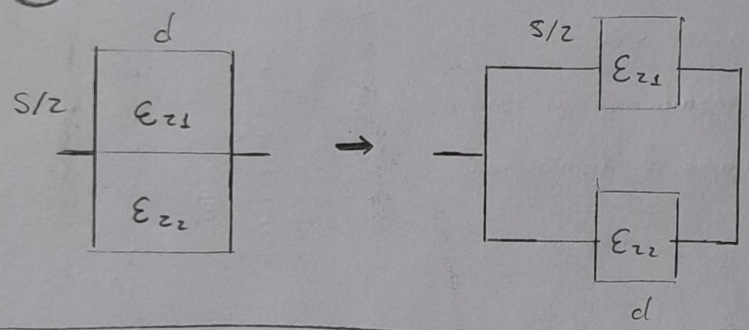
$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{S}{d/2}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{S}{d/2}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\boxed{C = 2\,\varepsilon_0 \frac{S}{d} \left(\frac{\varepsilon_{r1}\,\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}} \right)}$$

2º



$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{S/2}{d}$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{S/2}{d}$$

$$C = C_1 + C_2$$

$$\boxed{C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \left(\frac{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}}{2} \right)}$$

---

1. Intensidad de corriente eléctrica

Corriente ⟶ movimiento electrones a través de un conductor

+ Continua
+ Alterna

Intensidad ⟶ $I = \frac{Q}{t}$ (Amperios)

- Intensidad y densidad de corriente

⇒ Densidad c.

$$J = \frac{I}{S} \; ; \qquad I = q \cdot n \cdot v_d \cdot S \; ; \qquad \boxed{\vec{J} = q n v_d}$$

Para cualquier tipo de corriente $I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$

2. Ley de Ohm ($V = I \cdot R$)

⇒ Conductores óhmicos $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$ σ = conductividad

⇒ Ley de ohm operacional $\boxed{V_1 - V_2 = I \cdot R}$; $I = \frac{V_1 - V_2}{R}$

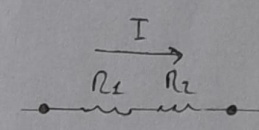
- Resistencia eléctrica, conductividad, resistividad

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{S}$$

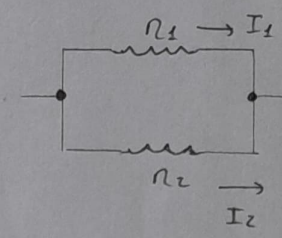
Resistividad (ρ) ⇒ $\rho = \frac{1}{\sigma}$ → conductividad

- Asociación de resistencias

+ En serie → $\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2}$



+ En paralelo → $\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$



3. Ley de Joule (potencia disipada por el conductor)

$$P = (V_A - V_B) I = I^2 R = \frac{(V_A - V_B)^2}{R}$$

¡3 formas!

4. Fuerza electromotriz (fem)

$$\varepsilon = \frac{dW}{dq} \longrightarrow P = \frac{dW}{dq}\frac{dq}{dt} = \boxed{\varepsilon . I}$$

→ $P_{suministrada} = \varepsilon . I$

→ $P_{consumida} = I^2 (r + R)$

$$P_c = P_s \Longrightarrow \boxed{I = \frac{\varepsilon}{R+r}}$$

Ley de ohm generalizada

5. Introducción a circuitos eléctricos

- Resistor → resistencia $V = I.R$ ohmio Ω
- Condensador → capacidad Faradio F
- Inductancia → inducción Henrio H

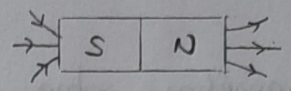
Tema 2 : "Campo Magnético"

1. Campo magnético. Vector inducción magnética

$\vec{B}$ se mide en Tesla (T) $\quad 1T = N.s / C.m$

$\boxed{1\,G = 10^{-4}\,T}$ Gauss (G)

lineas de campo son cerradas



Salen del polo Norte y entran por el polo Sur

2. Fuerza magnética

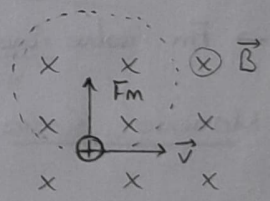
$$\boxed{\vec{F_m} = q(\vec{v} \times \vec{B})}$$

+ Módulo $\longrightarrow$ $F_m = q(vB \operatorname{sen} \alpha)$
+ Dirección $\longrightarrow$ $\perp$ a $\vec{v}$ y $\vec{B}$
+ Sentido $\longrightarrow$ regla mano derecha

$\vec{v} \perp \vec{F_m} \implies \boxed{W_{A \to B} = 0}$

• Aplicaciones

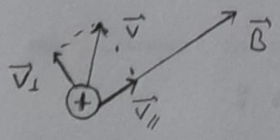
⊕ Situación 1 : $\vec{v} = \vec{v}_\perp$; $\vec{B} = cte$



$\boxed{F_m = F_c} \Rightarrow \quad qvB = m\dfrac{v^2}{r}$

radio, velocidad lineal, velocidad angular, periodo, frecuencia

⊕ Situación 2 : $\vec{v} = \vec{v}_{//} + \vec{v}_\perp$; $\vec{B} = cte$



- Fuerza de Lorentz

Si existe tbm un campo eléctrico la fuerza total sobre una carga puntual q será:

$$\boxed{\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m}$$

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = (q \cdot \vec{E}) + q(\vec{v} \times \vec{B}) = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Fuerza magnética sobre una corriente eléctrica

→ Fm sobre un hilo conductor rectilíneo $\boxed{F_m = I(\vec{l} \times \vec{B})}$

→ Fm sobre un hilo conductor (general) $\boxed{F_m = I\left(\int_L d\vec{l}\right) \times \vec{B}}$

→ Fm sobre un hilo conductor cerrado $\boxed{F_m = 0}$

→ Fm sobre una espira de corriente $\boxed{F_m = 0}$

Momento dipolar magnético $\Longrightarrow$ $\vec{M} = I\vec{S}$

$\vec{M} = (N) I \vec{S}$

Torsión $\Longrightarrow$ $I\vec{S} \times \vec{B} = \tau$

$\vec{M} \times \vec{B} = \tau$ ¡Si $S \parallel B$ no hay rotación!

3 Ley de Biot y Savart. Aplicaciones

→ Campo magnético creado por corrientes eléctricas:

$$\boxed{d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\,dl}{r^2} \vec{u}_l \times \vec{u}_r}$$

→ Campo magnético creado por una corriente rectilínea

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}\,\vec{i}}$$

(Módulo + dirección + sentido)

→ Campo magnético creado por una espira de corriente ...

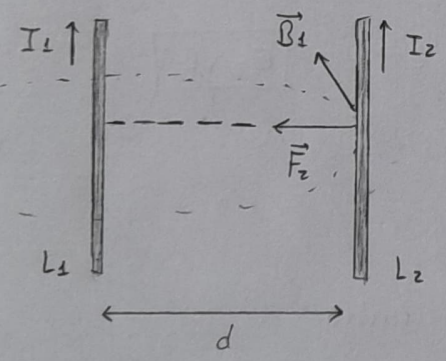
$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot r}\,\vec{j}}$$

en su centro

$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{2}\,\frac{I \cdot R^2}{(R^2 + a^2)^{3/2}}}$$

en su eje

→ Fuerza magnética entre corrientes paralelas



$$F_2 = \frac{\mu_0}{2\pi}\,\frac{I_1 I_2}{d}\,L_2 \qquad F_1 = \frac{\mu_0}{2\pi}\,\frac{I_1 I_2}{d}\,L_1$$

$$\boxed{\frac{F_2}{L_2} = \frac{F_1}{L_1} = \frac{\mu_0}{2\pi}\,\frac{I_1 I_2}{d}}$$

4. Ley de Ampere. Aplicaciones.

Para corrientes estacionarias y continuas $\Longrightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$

➡ Campo magnético creado por un $\boxed{\text{toroide}}$ $\boxed{B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi \cdot r}}$ N = nº espiras

➡ Campo magnético creado por un $\boxed{\text{solenoide}}$ $\boxed{B = \mu_0 \cdot n \cdot I}$

$$\boxed{\text{¡Exterior} \longrightarrow B = 0\,!}$$

$n = \frac{\text{nº espiras}}{\text{longitud}}$

5 Fenómenos de inducción electromagnética. ley de Faraday - Lenz

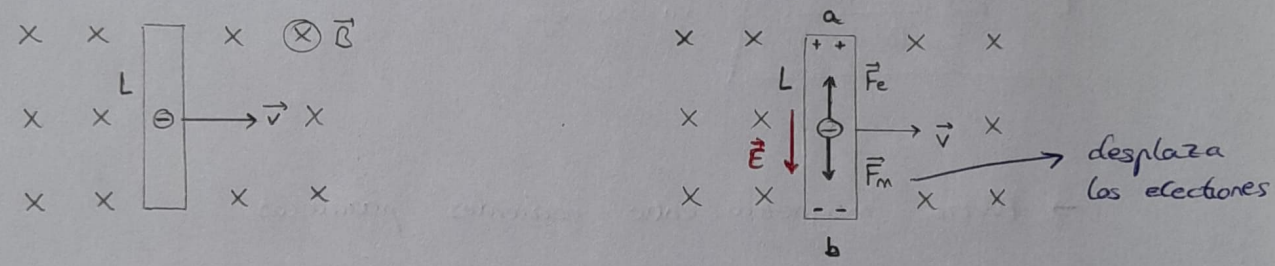
La fem inducida, es igual y de signo contrario, a la rapidez con que varía el flujo magnético.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$$

El sentido de la corriente inducida es tal que siempre se opone a la variación del flujo que la produce.

• Fuerza electromotriz debida al movimiento

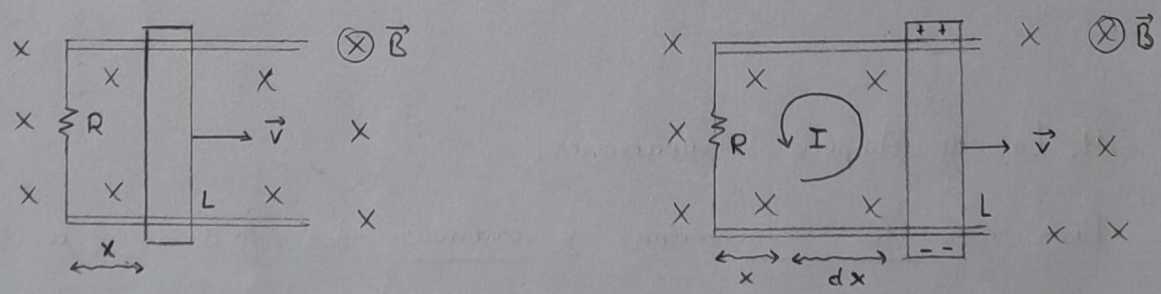
A) Varilla conductora móvil en un campo magnético



$$\vec{F_e} + \vec{F_m} = 0 \Rightarrow |\vec{F_m}| = |\vec{F_e}| \; ; \quad evB = eE \; ; \quad \boxed{E = vB}$$

$$\boxed{\varepsilon = V_{ab} = vBL} \; ; \quad \boxed{\varepsilon = V_{ab} = E.L}$$

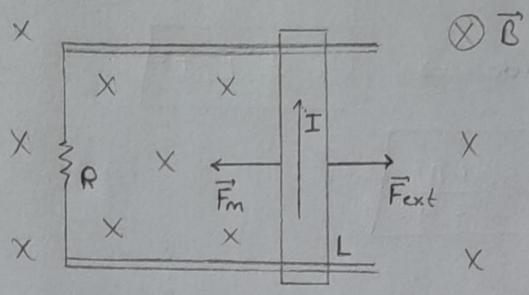
B) Varilla conductora móvil que forma un circuito



$$\boxed{\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt} = vBL} \qquad \boxed{I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{vBL}{R}}$$

¡ Importante ! ⇒

c) Trabajo y energía del proceso. Estudio energético.



$\boxed{v = cte}$ $\boxed{F_m = I\ell B}$

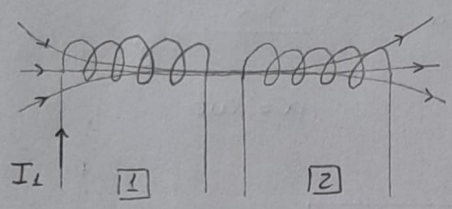
- Potencia entregada:

$$P = F_{ext} \cdot v = ILBv = \frac{vBL}{R} LBv = \frac{(BLv)^2}{R}$$

- Potencia disipada en R:

$$P_R = I^2 R = \left(\frac{vBL}{R}\right)^2 \cdot R = \frac{(vBL)^2}{R}$$

- Inducción mutua



$$\boxed{\varepsilon_1 = -M \frac{dI_2}{dt}}$$

$$\boxed{\varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt}}$$

Varía I_1 → varía B_1 ⟶ induce fem en $\boxed{2}$

- Autoinducción ⇒ la fem autoinducida se opone a la variación de intensidad

$$\boxed{\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}} \Rightarrow L\ (\text{inductancia}) = \frac{d\phi}{dI} \quad (\text{Henrios, H})$$

+ Asociación de autoinducciones:

$\boxed{\text{En serie}}$

$$L_{eq} = L_1 + L_2$$

$\boxed{\text{En paralelo}}$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

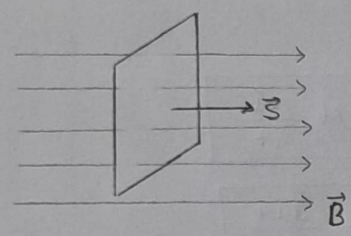
6. Densidad de energía del campo magnético

- Energía almacenada en un conductor $\Rightarrow$ $\boxed{U = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2}$

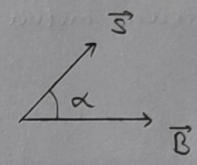
- Densidad de energía $\Rightarrow$ $\boxed{\eta_B = \frac{U}{V_s} = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}}$

- Generador de fem sinusoidal

⊕ Corriente alterna $\longrightarrow$ corriente que varía con el tiempo



bobina gira



$\alpha = \omega t$

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d}{dt}(NBS\cos\omega t) = \boxed{NBS\omega \operatorname{sen}\omega t} = V_0 \cdot \operatorname{sen}\omega t$$

$\operatorname{sen}\alpha = 1 \Longrightarrow$ valor máximo ; $\varepsilon_{max} = \omega NBS$

Corriente $\longrightarrow$ $\boxed{I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{V_0}{R}\operatorname{sen}\omega t = \frac{\varepsilon_{max}}{R}\operatorname{sen}\omega t}$

7. Dispositivos electrónicos en circuitos

- Circuitos de corriente continua !! estado estacionario // transitorio

① Resistencia : $I_0 = \frac{V}{R}$; $I_f = \frac{V}{R}$

② Condensador : $I_0 = \frac{V}{R}$; $I_f = 0$ $\rightarrow$ condensador cargado estado estacionario

constante de tiempo $\Longrightarrow$ $\boxed{\tau = R \cdot C}$

③ Autoinducción : $I_0 = 0$; $I_f = \frac{V}{R}$ $\rightarrow$ estado estacionario

$\boxed{\tau = \frac{L}{R}}$

- Circuitos de corriente alterna

① Resistencia : $I(t) = \frac{V_0}{R} \operatorname{sen} \omega t$

② Condensador : la tensión se retrasa $\pi/2$ rad con respecto a la corriente.

③ Autoinducción : la tensión se adelanta $\pi/2$ rad con respecto a la corriente.

8. Propiedades magnéticas de la materia

- Dipolo magnético $\Rightarrow$ $\boxed{\vec{M} = \vec{I} \cdot S}$

Vector magnetización $\longrightarrow$ $\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}$ $\quad \frac{\text{momento mg}}{\text{volumen}}$

Campo magnético total $\Rightarrow$ $\boxed{B_T = \vec{B}_{ext} + \mu_0 \vec{M}}$

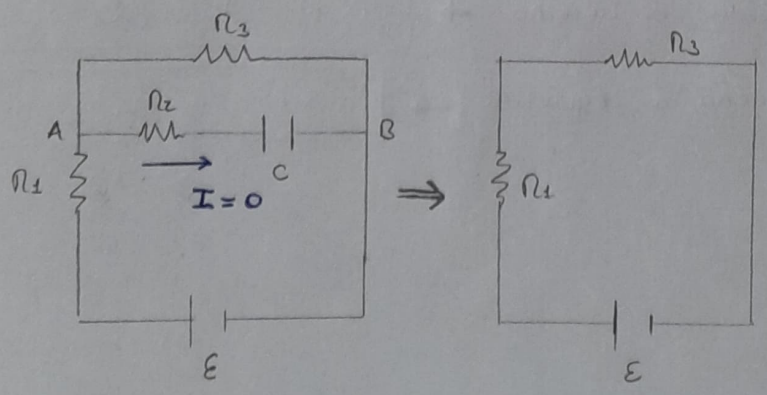
- Materiales según su comportamiento frente a un campo magnético exterior.

→ Diamagnéticos $\Rightarrow$ sin momento dipolar magnético, debilitan el campo magnético.

→ Paramagnéticos $\Rightarrow$ momento dipolar magnético permanente, aumentan el campo magnético débilmente

→ Ferromagnéticos $\Rightarrow$ aumentan el campo magnético fuertemente.

* Condensador en circuito corriente continua I?



$$I = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_3}$$

$$Q = C(V_A - V_B)$$

Tema 3 : "Ondas electromagnéticas"

1. Ecuaciones de Maxwell

- Ley generalizada de Ampère o ley de Ampère - Maxwell

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I + Id)$$ → corriente de desplazamiento

$$Id = \frac{d\phi_E}{dt} \cdot \varepsilon_0$$

- Ecuaciones de Maxwell

1. ley de Gauss para el campo eléctrico $\boxed{\phi_E = \oint\!\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}}$

2. ley de Gauss para el campo magnético $\boxed{\phi_m = \oint\!\!\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0}$

3. ley de Faraday $\boxed{\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}}$

4. ley de Ampere - Maxwell $\boxed{\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \left(I + \varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}\right)}$

2. Ondas electromagnéticas

- Ecuación de ondas

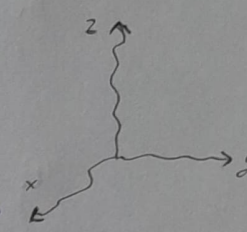
+ Con sentido de izquierda a derecha → $\boxed{y(x,t) = A \operatorname{sen}(kx - \omega t)}$
+ Con sentido de derecha a izquierda → $\boxed{y(x,t) = A \operatorname{sen}(kx + \omega t)}$

* Elongación (y) metros (m)
* Amplitud (A) metros (m)
* Frecuencia angular o pulsación (ω) $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$ (rad/s)

  periodo → T; frecuencia → f
* Número de ondas (k) $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (rad/m)

  λ → longitud de onda
* Velocidad de propagación (v) $c = v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$ (m/s)

• Ondas electromagnéticas planas



Velocidad de propagación $= c = 3 \cdot 10^8$ m/s

→ $\boxed{\vec{E}(x,t) = E_0 \operatorname{sen}(kx - \omega t)\,\vec{j}}$

→ $\boxed{\vec{B}(x,t) = B_0 \operatorname{sen}(kx - \omega t)\,\vec{k}}$

dirección ⇒ $\vec{E} \times \vec{B}$

$E_0 = c \cdot B_0$

¡Ojo!

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{E}(x,t) &= E_0 \cdot \operatorname{sen}(kx - \omega t)\,\vec{k} \\ \vec{B}(x,t) &= -B_0 \operatorname{sen}(kx - \omega t)\,\vec{j} \end{aligned}}$$

E_0, B_0 ⇒ valores máximos

3. Energía de una onda electromagnética. Vector de Poynting

Intensidad instantánea ⟹ $\boxed{I_i = \eta \cdot c = \frac{E \cdot B}{\mu_0}}$ (W/m²)

⊛ Intensidad media ⇒ $I = \bar{\eta} \cdot c$ → densidad media (J/m³)

Densidad energía eléctrica ⟹ $\eta_E = \frac{1}{2} \varepsilon E^2$

Densidad energía magnética ⟹ $\eta_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$

⟹ $\boxed{\eta_E = \eta_B}$

⊛ $I = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} \frac{c B_0^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{\mu_0}$

¡3 formas distintas!

$\boxed{I = \frac{P}{S}}$

• Vector de Poynting $\Rightarrow$ $\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu}$

módulo del vector = intensidad ~~instantánea~~ media $\Rightarrow$ $\boxed{S = c \frac{B_0^2}{\mu} \operatorname{sen}^2 (kx - \omega t)}$

$$\boxed{S(m) = \frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{\mu}}$$

Densidad media de energía $\Rightarrow$ $\bar{\eta} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \boxed{\frac{1}{2} \frac{E_0 B_0}{c \mu_0}}$

4 Cantidad de movimiento. Presión de radiación.

C. de movimiento $\Rightarrow$ $\vec{p} = \frac{W}{c} \vec{u}_z$ $\longrightarrow$ energía total

Presión de radiación $\Rightarrow$ $P_r = \frac{\vec{F}}{S} = \frac{I_m}{c}$; $\boxed{P_r = \frac{E_0 B_0}{2 \mu_0 c}}$ (Pa)

superficie absorbe toda la energía

Refleja toda la energía $\longrightarrow$ $\boxed{P_r = 2 \frac{I_m}{c} = \frac{E_0 B_0}{\mu_0 \cdot c}}$

5 Espectro de las ondas electromagnéticas

A mayor frecuencia $\longrightarrow$ menor longitud de onda

Bloque 2. Tema 4 "Física cuántica"

1 Radiación y materia: dualidad onda-corpúsculo.

La física clásica tiene límites: Problemas precursores

- **Radiación del cuerpo negro**: sistema ideal que absorbe toda la radiación que sobre él incide. La naturaleza de la radiación emitida por este cuerpo, solo depende de la temperatura de las paredes.

radiancia !!

Ley de Stefan ⇒ $\boxed{R_T = \sigma \cdot T^4}$, $\sigma = cte$

Ley de desplazamiento de Wien ⇒ $\boxed{\lambda_{max} = \frac{k_w}{T}}$, $k_w = cte$

→ **Solución**: energía cuantizada ⇒ la energía electromagnética no se intercambia de forma continua con la materia, sino en "paquetes" o cuantos de energía proporcionales a la frecuencia de radiación.

$\boxed{\Delta E = n h \nu}$ $h = cte$ de Planck $= 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ J.s

Teoría cuántica de Planck

- **Efecto fotoeléctrico**: emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética.

+ No se emiten electrones cuando se hace incidir radiación por debajo de la frecuencia umbral.

+ La energía cinética de las fotoelectrones depende de la frecuencia luminosa.

Física clásica no podía explicar:
- → Ec no depende de I
- → ν_0
- → Emisión instantánea de los electrones no hay retraso

➡ **Solución**: carácter corpuscular (Einstein) ⇒ la onda electromagnética puede considerarse como un flujo de corpúsculos o fotones de energía.

$$\boxed{\begin{aligned} E_{luz} &= W_0 + E_c \\ h\nu &= h\nu_0 + \frac{1}{2}mv^2 \end{aligned}}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$$

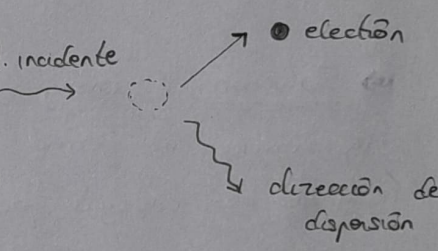
Para que ⇒ haya efecto fotoeléctrico: $E_{luz} > W_0$, $\nu_{luz} > \nu_0$

W_0 ⇒ trabajo de extracción (energía necesaria para extraer al electrón del metal)

• **Efecto Compton**: los fotones colisionan con los electrones libres del blanco dispersor, el fotón transfiere parte de su energía al electrón.

Ec. del desplazamiento de Compton

$$\boxed{\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\alpha) \; ; \quad \Delta\lambda = \lambda_c(1-\cos\alpha)}$$



longitud de onda Compton $\lambda_c = cte$

¡OJO! Diferencia con respecto a la interacción radiación - electrón en el Ef. fotoeléctrico y Ef. Compton.

- Ef. fotoeléctrico → electrón está ligado al átomo
- Ef. Compton → electrón libre

• **Principio de De Broglie**: todo, tanto materia como radiación, tiene carácter corpuscular y ondulatorio, teniendo una longitud de onda:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p} \; ; \; \lambda = \frac{h}{mv}}$$

2. Principio de incertidumbre

➡ Enunciado 1: no puede medirse simultáneamente con toda precisión la posición y el momento lineal de una partícula.

$$\boxed{\Delta x \, \Delta p > \frac{h}{4\pi}}$$

"probabilidad de que una partícula esté en una det. posición"

➡ Enunciado 2: no puede medirse simultáneamente con toda precisión la energía que absorbe o emite un átomo y en el instante en que lo hace.

$$\boxed{\Delta E \, \Delta t > \frac{h}{4\pi}}$$

Principio de complementariedad de Neils Bohr ⇒ depende del dispositivo experimental → comportamiento ondulatorio ó corpuscular.

3. Mecánica ondulatoria & Ecuación de Schröndinger

Evolución modelos atómicos:

Thompson ⟹ Rutherford ⟹ Bohr ⟹ Mecánica ondulatoria

e^- p^+ — núcleo y corteza — Planck H — Broglie

El estado de una partícula se describe por medio de una función de onda $\Psi(x, y, z, t)$

$$\boxed{dP = \underbrace{|\Psi(xyz)|^2}_{\text{densidad de probabilidad}} dV}$$

"probabilidad de que la partícula se encuentre dentro del volumen"

Ec. de Schrodinger <u>independiente del tiempo</u> para <u>una dimensión</u>

$$\boxed{\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + (E - U(x))\,\Psi(x) = 0}$$

masa

mueve en eje x

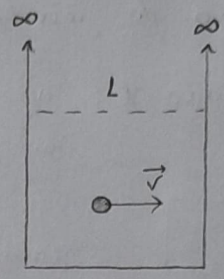
energía total del sistema

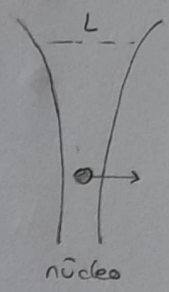
energía potencial

→ Partícula en un pozo de potencial:

Condiciones de contorno ⇒ $\boxed{\text{estados cuánticos}}$

Nos dan las distintas funciones de onda permitidas

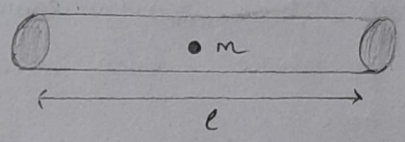




¡Ojo!

$m = 30\,g$

$l = 30\,cm$



$$\boxed{E_n = \frac{h^2}{8ml}n^2}$$

a)

$n = 1 \Rightarrow E_1 = \frac{h^2}{8ml^2} = \boxed{2{,}02 \cdot 10^{-65}\ J}$ prácticamente no tiene energía

$\boxed{E_c = \frac{1}{2}mv^2}$; $v = \sim 10^{-32}\ m/s$ bola en reposo

b) $v = 30\ cm/s = 0{,}3\ m/s$ $n = ?$

$E_1 n^2 = E_n \longrightarrow E_n = \frac{1}{2}mv^2 = E_c$

$n = \sqrt{\frac{E_n}{E_1}} = 10^{29}$

Sistema macroscópico ⇒ • la situación energética es continua

• no existe casi diferencia entre un estado cuántico y otro

4. Estados de energía atómicos $\psi(x, y, z)$

las soluciones de la ec. de Schrodinger $\Rightarrow$ funciones de onda energías caracterizadas por nº cuánticos

nº cuánticos $\Rightarrow$ originados por las condiciones de contorno

~~Orbitas~~ $\longrightarrow$ regiones en las que es probable encontrar al electrón ("orbital atómico")

$\rightarrow$ **Nº cuánticos** 3 nº $\rightarrow$ definen el estado de energía del orbital
+
1

- Nº cuántico principal '**n**' $\Rightarrow$ indica el nivel energético del electrón $n = 1, 2, 3, \ldots$

- Nº cuántico del momento angular, azimutal o secundario '**ℓ**' $\Rightarrow$ indica la forma de la región por la que se mueve el electrón $\ell = 0, 1, \ldots, (n-1)$

- Nº cuántico magnético '**m_ℓ**' $\Rightarrow$ orientación del orbital ante un campo mg. $-\ell \ldots +\ell$

- Nº cuántico de spin electrónico '**m_s**' $\Rightarrow$ momento angular momento dipolar $\frac{1}{2}$ y $-\frac{1}{2}$

¡CADA ORBITAL ESTÁ CARACTERIZADO POR 3 NÚMEROS CUÁNTICOS!
+ ms

$\rightarrow$ Principio de exclusión de Pauli: 2 electrones en un átomo no pueden tener los mismos 4 números cuánticos

➡ Configuración electrónica

Ge (32) = $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^2$

$1s^2$
$2s^2\ 2p^6$
$3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}$
$4s^2\ 4p^6\ 4d^{10}\ 4f^{14}$
$5s^2\ 5p^6\ 5d^{10}\ 5f^{14}$
$6s^2\ 6p^6\ 6d^{10}$
$7s^2\ 7p^6$

Las propiedades de los elementos de cada grupo (columna T.P.) están muy relacionadas porque todos tiene la misma configuración electrónica externa (electrones de valencia)

Tema 5 "Introducción al estado sólido"

1. Estructura del estado sólido

➡ Materia condensada : energía potencial de interacción
orden espacial

➡ Materia gaseosa : energía cinética de traslación
distribución caótica.

➡ Sólidos amorfos o no cristalinos : los átomos o moléculas están dispuestos de manera aleatoria

➡ Sólidos cristalinos : átomos, moléculas o iones constituyen una distribución ordenada. Patrón ⇒ red cristalina

S. Moleculares	S. covalentes	S. iónicos	S. metálicos
enlaces de hidrógeno o Van der Waals	enlaces covalentes	enlaces iónicos	enlaces metálicos

➡ Configuración electrónica

$Ge(32) = 1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^2\ 3d^{10}\ 4p^2$

$1s^2$
$2s^2\ 2p^6$
$3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}$
$4s^2\ 4p^6\ 4d^{10}\ 4f^{14}$
$5s^2\ 5p^6\ 5d^{10}\ 5f^{14}$
$6s^2\ 6p^6\ 6d^{10}$
$7s^2\ 7p^6$

Las propiedades de los elementos de cada grupo (columna T.P.) están muy relacionadas porque todas tiene la misma configuración electrónica externa (electrones de valencia)

Tema 5 "Introducción al estado sólido"

1. Estructura del estado sólido

➡ Materia condensada : energía potencial de interacción
orden espacial

➡ Materia gaseosa : energía cinética de traslación
distribución caótica.

➡ Sólidos amorfos o no cristalinos : los átomos o moléculas están dispuestos de manera aleatoria

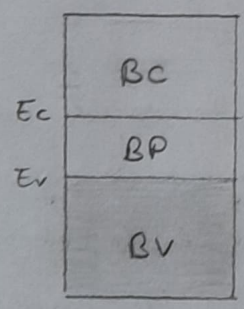
➡ Sólidos cristalinos : átomos, moléculas o iones constituyen una distribución ordenada. Patrón ⇒ red cristalina

S. Moleculares	S. covalentes	S. iónicos	S. metálicos
enlaces de hidrógeno o Van der Waals	enlaces covalentes	enlaces iónicos	enlaces metálicos

2. Tipos de sólidos cristalinos

	Características	Propiedades
C. Moleculares	+ Formado por moléculas. + Enlaces de Van de Waals ó puentes de H.	+ Malos conductores del calor y la electricidad
C. Covalentes	+ Enlaces covalentes	+ Malos conductores, se requiere mucha energía para romper enlaces
C. Iónicos	+ Enlaces iónicos ↙ aniones ↘ cationes	+ En líquido o fundidos sí son buenos conductores. (Iónicos)
C. metálicos	+ Electrones deslocalizados por todo el metal	+ Buenos conductores de la electricidad.

3. Bandas de energía (niveles discretos de energía)



- **Banda de conducción (BC)**: estados permitidos, vacíos, banda permitida de energía mas baja. ↘ Ec nivel más bajo
- **Banda prohibida (BP)**: valores de energía prohibidos
- **Banda de valencia (BV)**: estados permitidos, ocupados nivel más alto de la BV de energía Ev

$E_c - E_v = \boxed{E_a} \longrightarrow$ ancho de la banda prohibida

$\boxed{\uparrow E_a} \Rightarrow$ aislantes ~ 10 eV

$\boxed{\downarrow E_a} =$ semiconductores ~ 1 eV

$\boxed{E_a = 0}$ conductores

energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura nula.

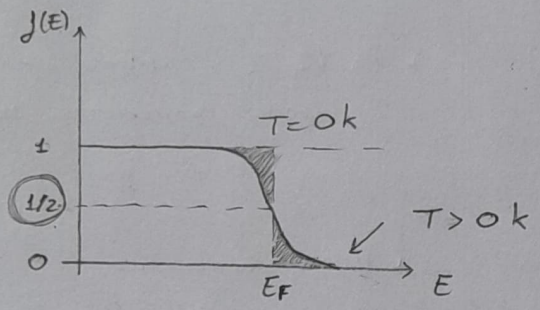
- **Energía de Fermi.** ⟹ probabilidad de encontrar un electrón en un estado de energía E viene dada por:

Función de distribución de Fermi ⟹ $f(E) = \dfrac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{k_B \cdot T}}}$

k_B (cte de Boltzman) = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K ó $8{,}62 \cdot 10^{-5}$ eV/K

Probabilidad de encontrar al electrón → independiente de la temperatura

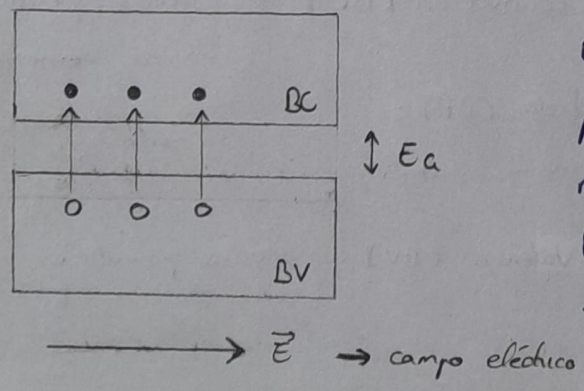
↑ temp ⟹ ↑ energía



¡ Aumentamos la temperatura, los e^- que están en los niveles de energía más altos en la BV se agitan y saltan a los niveles más bajos de energía de la BC. !

Energía térmica = $k_B \cdot T$

- **Mecanismos de conducción eléctrica**



Un electrón en la banda de valencia puede adquirir suficiente energía como para convertirse en un electrón libre que contribuya a la conducción eléctrica.

⊛ los e^- "avanzan" en sentido contrario a $\vec{E}$

⊛ los huecos "avanzan" (Carga ⊕) en el sentido de $\vec{E}$

➡ Energía térmica : $\boxed{U = k_B \cdot T}$

$T > 0k \Rightarrow$ probabilidad de salto de los e^- $\propto$ temperatura
inv. a E_a

➡ Aumenta el nº de e^- en la BC = Aumenta la <u>densidad de portadores de carga negativa</u> (n).

➡ Aumenta el nº de huecos = Aumenta la <u>densidad de portadores de carga positiva</u> (p)

• Conductores (→ parcialmente llena), semiconductores (llena) y aislantes. Estructura de bandas y nivel de Fermi.

los <u>semiconductores</u>
- baja temp ⇒ aislantes $t = 0k$
- aumentamos temp ⇒ estados ocupados en la BC $t = 300$

4. Modelos de conducción eléctrica

➡ Conductividad : $J = e^- \cdot n \cdot v_d$ (densidad de corriente) ; $\sigma = \frac{1}{\rho}$; $\boxed{\sigma = n_e \cdot e \cdot \mu}$ (n_e: densidad de electrones)

➡ Movilidad electrónica (facilidad con que el e^- se mueve) : $\boxed{\mu = \frac{V_d}{E}}$

• Modelo clásico del electrón libre : Modelo de Drude - Lorentz

+ Se considera un metal como una red cristalina tridimensional de iones que ocupan un volumen **V** y contienen **N** electrones libres.

+ Gas de electrones (electrones de valencia) se distribuye uniformemente por el cristal metálico

+ Ausencia de voltaje → los e^- se mueven aleatoriamente.

Calcular la densidad de electrones libres (n):

$$n = \frac{V_a \cdot N_A \cdot d}{m_{mol}} \quad (cm^{-3},\ m^{-3}) \rightarrow e/m^3$$

$V_a \Rightarrow$ nº de eletrones libres / átomo

$N_A \Rightarrow$ nº de Avogadro $(6{,}022 \cdot 10^{23})$

$d \Rightarrow$ densidad $(g/cm^3,\ kg/m^3)$

$m_{mol} \Rightarrow$ masa atómica del elemento (g/mol)

Velocidad de un electrón:

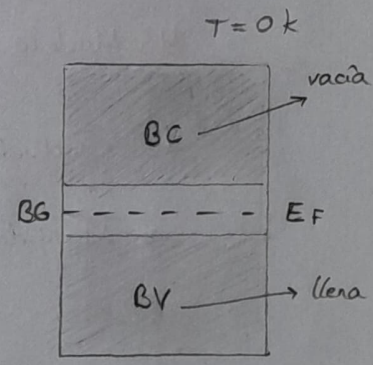
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad ; \quad E_c = E_F \quad ; \quad v = \sqrt{\frac{2E_F}{m_e}}$$

Tema 6 "Física de semiconductores"

1. Introducción. Conceptos básicos.

- Características generales de los materiales semiconductores

➡ Conductividad depende de la temperatura y aumenta rápidamente con ella.



➡ Aparición de 2 tipos de portadores de carga: e^- en BC y h^+ en BV.

➡ Sus propiedades físicas dependen altamente de la concentración de impurezas añadidas al material.

Calcular la densidad de electrones libres (n):

$$n = \frac{V_a \cdot N_A \cdot d}{m_{mol}} \quad (cm^{-3},\ m^{-3}) \rightarrow e/m^3$$

$V_a \Rightarrow$ nº de electrones libres / átomo

$N_A \Rightarrow$ nº de Avogadro $(6{,}022 \cdot 10^{23})$

$d \Rightarrow$ densidad $(g/cm^3,\ kg/m^3)$

$m_{mol} \Rightarrow$ masa atómica del elemento (g/mol)

Velocidad de un electrón:

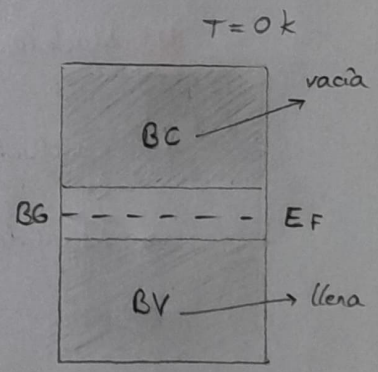
$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad ; \quad E_c = E_F \quad ; \quad v = \sqrt{\frac{2E_F}{m_e}}$$

Tema 6 "Física de semiconductores"

1. Introducción. Conceptos básicos.

- Características generales de los materiales semiconductores

➡ Conductividad depende de la temperatura y aumenta rápidamente con ella.

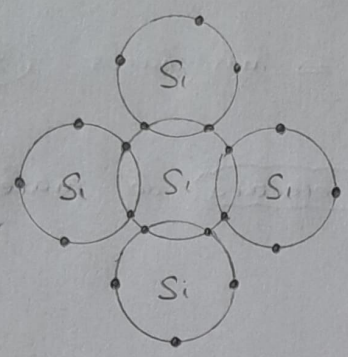


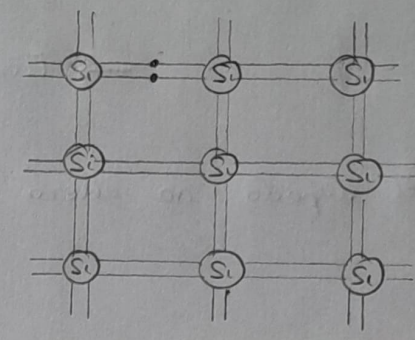
➡ Aparición de 2 tipos de portadores de carga: e^- en BC y h^+ en BV.

➡ Sus propiedades físicas dependen altamente de la concentración de impurezas añadidas al material.

- Configuración electrónica y red cristalina

Silicio y Germanio ⟹ tienen 4 electrones en su última capa

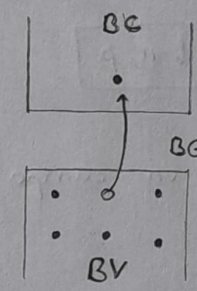


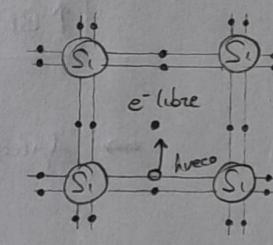


No hay electrones libres en movimiento, banda de valencia llena, banda de conducción vacía.

- Generación y recombinación

→ Se produce al añadir elementos que no están en el grupo IV en la estructura cristalina de un semiconductor. ¡Semiconductor extrínseco!





Aumento considerable de e^- ó h^+

→ Variando la temperatura o la luz. ⟹ se generan pares e^-/h^+

$n = p$

* Recombinación de pares e^- / h^+ (proceso inverso a la generación)

- Desaparición de un electrón y de un hueco, material mantiene la neutralidad eléctrica.

• Dopado de semiconductores (añadimos impurezas para modificar la conductividad eléctrica)

↓↓

S. extrínseco → Elementos grupo V ⇒ más electrones (tipo n)

→ Elementos grupo III ⇒ más huecos (tipo p)

El dopado no altera la neutralidad eléctrica del material.

2. Semiconductores intrínsecos

➡ Semiconductores puros !! (no tenemos átomos extraños) $\boxed{n = p \equiv n_i}$

densidad intrínseca

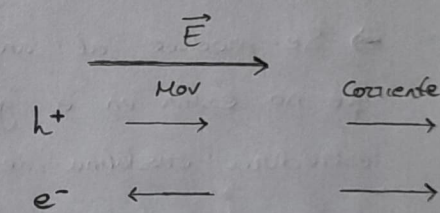
➡ Excitación térmica produce pares e^-/h^+

➡ Nivel de Fermi: centro de BP

$T = 0k$

$\boxed{\uparrow BP \rightarrow \downarrow n, p}$

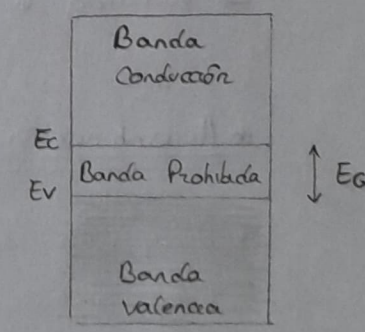
➡ Aplicamos un campo eléctrico:



• Estructura de bandas

$\boxed{E_c}$: mínima energía cinética de un electrón libre

$\boxed{E_v}$: mínima energía cinética de un hueco



• Concentración de portadores de carga

$\boxed{BC}$ para los electrones (n) $\boxed{BV}$ para los huecos (p)

➡ Densidad de electrones nº total de electrones por unidad de volumen

➡ Densidad de huecos nº total de huecos por unidad de volumen

$$\boxed{n = N_c\, e^{-(E_c - E_{Fi})/k_B T}} \qquad \boxed{p = N_v\, e^{-(E_{Fi} - E_v)/k_B T}}$$

➡ Producto de las concentraciones $\boxed{np = N_c N_v\, e^{-E_G/k_B T}}$ anchura banda prohibida

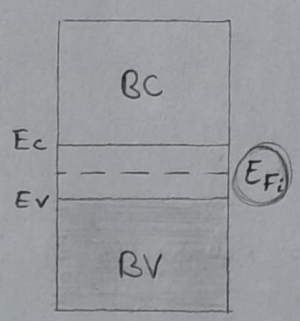
➡ ley de acción de masas $\boxed{np = n_i^2}$ Concentración intrínseca

$$n_i^2 = np \Longrightarrow \boxed{n_i = \sqrt{N_c N_v}\, e^{-E_G/2k_B T}} \qquad \boxed{n = p \equiv n_i}$$

$\uparrow T \quad \uparrow n_i$

• Nivel de Fermi

A la temperatura del cero absoluto, el nivel de Fermi se encuentra en centro de la banda prohibida.



$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$$

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \frac{m_p^*}{m_n^*}$$

$$m_p^* \simeq m_n^* \quad , \quad T = 0\,k$$

$$\boxed{E_F \simeq \frac{E_c + E_v}{2}}$$

• Conductividad y movilidad

➡ Conductividad de un semiconductor $\boxed{\sigma = \sigma_n + \sigma_p = en\mu_n + ep\mu_p}$

➡ Semiconductor intrínseco $n = p \equiv n_i$

$$\boxed{\sigma = n_i e (\mu_n + \mu_p)}$$

la conductividad aumenta exponencialmente con la $\boxed{\text{temperatura}}$ →

$$\sigma = \underbrace{\sqrt{N_c N_v}}\, e^{-E_G/2k_BT}\, \underbrace{e(\mu_n + \mu_p)}$$

$$\boxed{\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-E_G/2k_BT}}$$

8. Semiconductores extrínsecos

➡ Estructuras con átomos extraños (impurezas)

➡ Átomos de impurezas tienen una configuración electrónica diferente y pueden aportar electrones o huecos.

➡ $\boxed{\text{Tipo } n}$ (densidad mayoritaria de e^-), $\boxed{\text{tipo } p}$ (densidad mayoritaria de h^+)

elementos grupo V — elementos grupo III

Impurezas donadoras ↙ — Impurezas aceptoras ↙

• Semiconductor Tipo-n

➡ N_D impurezas donadoras (para cada átomo extraño, 1 de sus 5 e^- está libre)

➡ Hay mayor número de electrones que de huecos

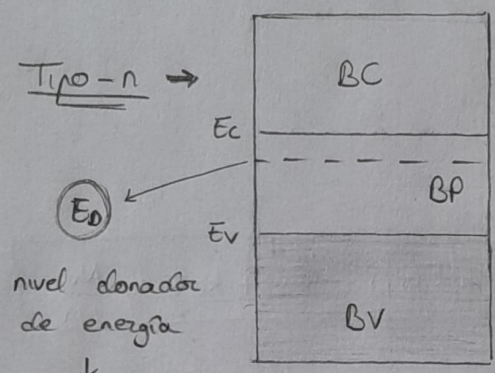
$$n = p \Longrightarrow \boxed{n \gg p}$$

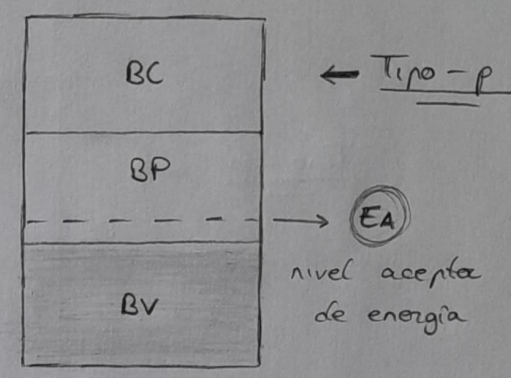
- **Semiconductor Tipo - p**

→ N_A impurezas aceptoras (aparición de un hueco, h^+)

→ Hay mayor número de huecos que de electrones $\boxed{p \gg n}$

- **Diagramas de bandas**





- **Concentración de portadores de carga**

Ley de neutralidad eléctrica ⟹ $\boxed{N_D + p = N_A + n}$ → cargas + = cargas −

Tipo - n: $N_D + p = n$

Concentración de portadores mayoritarios → $\boxed{n \simeq N_D}$

↘ $N_D \gg n_i$

Concentración de portadores minoritarios → $n_i^2 = np$

$$\boxed{p \simeq \frac{n_i^2}{N_D}}$$

Tipo - p: $p = N_A + n$

Concentración de portadores mayoritarios → $\boxed{p \simeq N_A}$

↘ $N_A \gg n_i$

Concentración de portadores minoritarios → $n_i^2 = np$

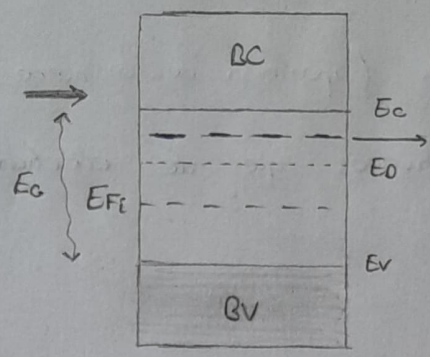
$$\boxed{n = \frac{n_i^2}{N_A}}$$

temperaturas bajas

¡Ojo! A pesar de que el material está dopado, si $n_i \gg$ el material puede presentar un comportamiento intrínseco. temperaturas altas

- Nivel de Fermi

Tipo-n ⟹

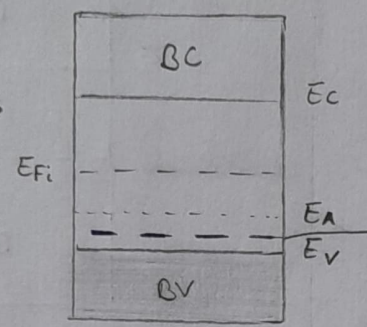


$$E_{F(n)} = E_C - k_B T \ln \frac{N_C}{N_D}$$

$$n = n_i e^{(E_F - E_{Fi})/k_B T}$$

$$n \approx N_D$$

Tipo-p ⟹



$$E_{F(p)} = E_V + k_B T \ln \frac{N_V}{N_A}$$

$$p = n_i e^{(E_{Fi} - E_F)/k_B T}$$

$$p \simeq N_A$$

- Conductividad

⟹ Tipo-n $\begin{cases} n \gg p \\ n \approx N_D \end{cases}$ $\boxed{\sigma_n \approx n \mu_n e}$ $\sigma \approx \sigma_n$

⟹ Tipo-p $\begin{cases} p \gg n \\ p \approx N_A \end{cases}$ $\boxed{\sigma_p = p \mu_p e}$ $\sigma \approx \sigma_p$

Corriente en un semiconductor ⟹ efecto combinado de 2 tipos de flujo

Sentido de los huecos ⟶ Sentido de los electrones ⟵

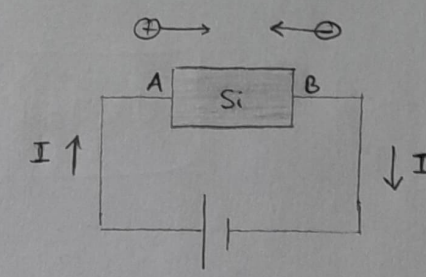
$\vec{E}$ ⟶

corriente I ⟶

4. Conducción eléctrica en semiconductores

- **Corriente de arrastre** (originada por la acción de un campo eléctrico externo)

Los huecos se mueven en la dirección del campo y los e^- libres en sentido opuesto.



→ Densidad de corriente de arrastre:

$$\boxed{\vec{J}_a = e(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}}$$

↓

→ S. intrínseco: $\boxed{\vec{J}_a = e\, n_i(\mu_n + \mu_p) \cdot E = \sigma \cdot \vec{E}}$

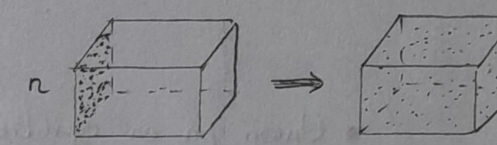
→ S. extrínseco: Tipo-n $\boxed{\vec{J}_a = \sigma_n \cdot \vec{E} \approx e n \mu_n \cdot \vec{E}}$ $\sigma_n \gg \sigma_p$

$\vec{J}_a = (\sigma_n + \sigma_p)\vec{E}$ Tipo-p $\boxed{\vec{J}_a = \sigma_p \cdot \vec{E} \approx e p \mu_p \cdot \vec{E}}$ $\sigma_p \gg \sigma_n$

- **Corriente de difusión** (la concentración de portadores no es uniforme, gradiente de concentraciones ⟹ movimiento de portadores de las zonas con alta concentración a las zonas de baja concentración)

→ Densidad de corriente de difusión

$$\boxed{J_{dif} = -D \cdot \vec{\nabla} c}$$



+ Forma unidimensional

$$\boxed{J_{n,dif} = e D_n \frac{\partial n}{\partial x}} \qquad \boxed{J_{p,dif} = -e D_p \frac{\partial p}{\partial x}}$$

- **Densidad de corriente total**

Modelo unidimensional:

→ $J_n = J_{n,a} + J_{n,dif} = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx}$

→ $J_p = J_{p,a} + J_{p,dif} = ep\mu_p E - eD_p \frac{dp}{dx}$

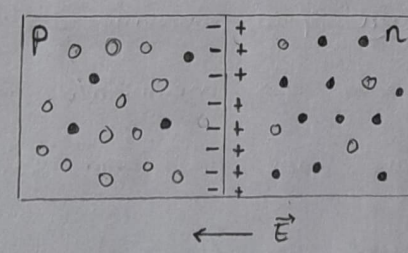
$$\boxed{J = J_n + J_p = eE(n\mu_n + p\mu_p) + e\left(D_n \frac{\partial n}{\partial x} - D_p \frac{\partial p}{\partial x}\right)}$$

5. Unión PN (semiconductor tipo-n + tipo-p)

Un solo cristal dopado en un lado por impurezas donadoras y en el otro lado por impurezas aceptoras.

→ Las concentraciones desiguales de portadores de carga dan lugar a una difusión hasta establecer un equilibrio.

- Electrones del lado n al lado p
- Huecos del lado p al lado n.



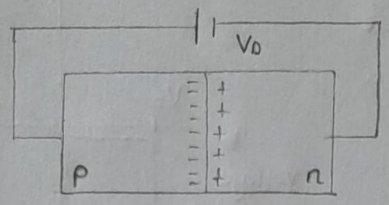
- **Unión pn en equilibrio**

→ Corriente neta de cargas libres nula

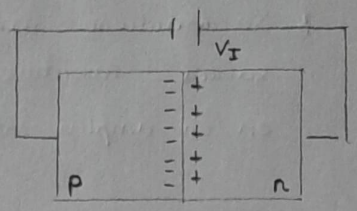
→ Barrera de potencial que se opone a las corrientes de difusión

$$\boxed{\begin{aligned} J_n(\text{difusión } n \to p) &= J_n(\text{arrastre } p \to n) \\ J_p(\text{difusión } p \to n) &= J_p(\text{arrastre } n \to p) \end{aligned}}$$

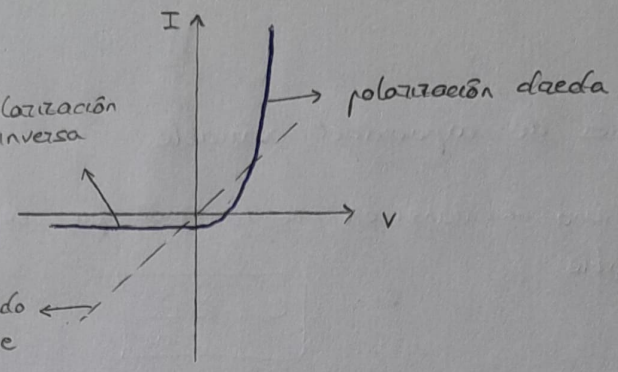
➡ Polarización Directa



➡ Polarización Inversa



$$I_{dif} = I_{0,dif}\, e^{qV_{ex}/k_BT}$$



• Unión pn polarizada

➡ Diodo (dispositivo formado por dos electrodos, conduce la corriente en un solo sentido)

+ Polarización directa ⇒ la corriente fluye casi libremente
+ Polarización inversa ⇒ casi no fluye corriente, pequeña corriente negativa

➡ Polarización. Aplicación de un voltaje externo

+ Rompe el equilibrio que existe en la unión pn
+ Corrientes de difusión se ven fuertemente alteradas
+ Corrientes de arrastre relativamente insensibles al efecto de polarización

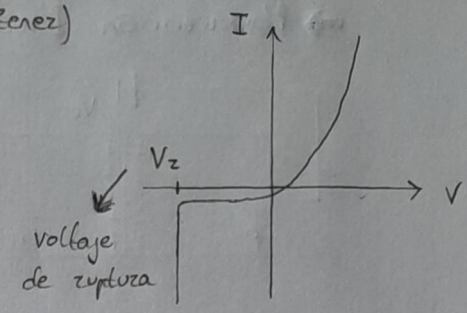
• Diodos semiconductores

① Diodo rectificador ⇒ + Polarización directa → rectificador
+ Corriente circula en el sentido de p a n

$$I = I_0 \cdot \left(e^{qV_{ext}/k_BT} - 1\right)$$

② Diodo regulador de voltaje (Diodo Zener)

+ Se mantiene constante el voltaje de salida, mientras la corriente varía en un amplio intervalo de valores.



③ Diodos de capacidad variable

+ la zona de transición de la unión pn se comporta como un condensador variable.

$$\boxed{C = \varepsilon \frac{S}{d}}$$

④ Diodo túnel

+ Concentración de impurezas grande ⟶ zona transición muy estrecha
+ Electrones pasan del lado n al p por efecto túnel.