El campo electrostático

F II

La carga eléctrica. Ley de Coulomb

Campo eléctrico. Teorema de Gauss

Potencial eléctrico. Energía potencial

El dipolo eléctrico

Conductores y dieléctricos

Polarización. Vector desplazamiento

Capacidad y energía electrostática

Corriente eléctrica. Ley de Ohm. Circuitos

UCM

F II

La carga eléctrica

Localización en la materia

Fluido eléctrico (+) y (-)

Paralelismo com masa gravitatoria

Descubrimiento electrón

J. J. Thomson (1897)

Descubrimiento núcleo atómico

E. Rutherford (1911)

UCM

La carga eléctrica

F II

Localización en la materia

Electrones (-) y protones (+)

Cuantificación

R. A. Millikan (1913)

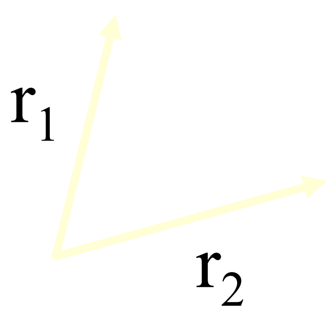
Conservación

UCM

F II

Ley de Coulomb (1785)

Ley experimental entre cargas puntuales



$$\mathbf{F}_{2,1} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{\left|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\right|^3}\left(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\right)$$

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ C^2/Nm^2$

Principio de superposición

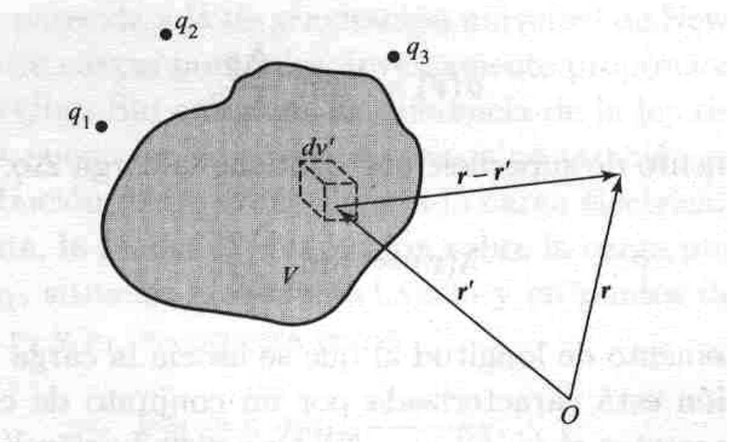
- Insuficiencia ley entre cargas puntuales
- Consecuencia linealidad
- Generalización a distribuciones continuas

UCM

F II

Campo eléctrico

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$



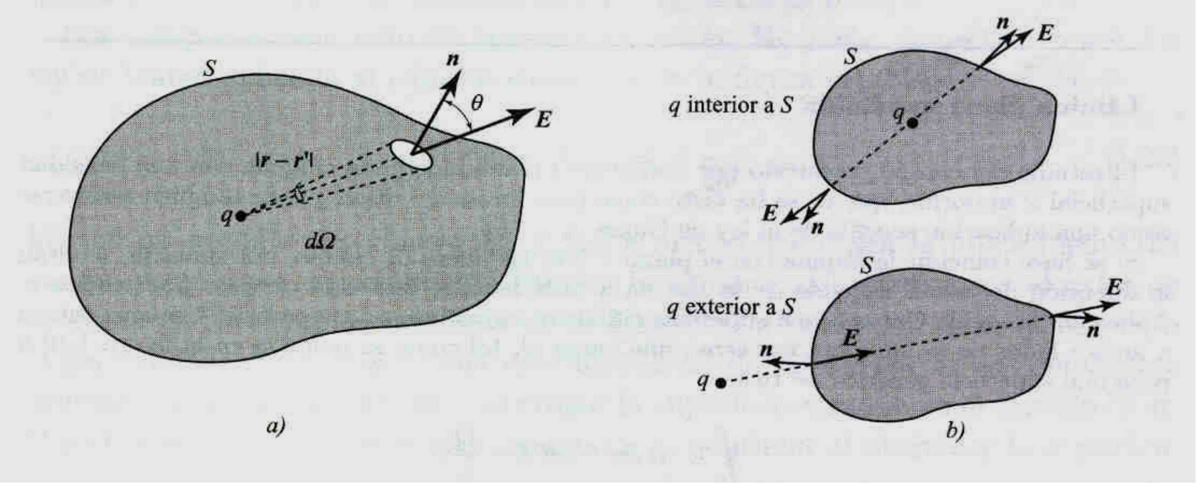
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\sum \frac{q_i}{\left|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i\right|^3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}_i) + \int \frac{\lambda dl'}{\left|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\right|^3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\right] +$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\int \frac{\sigma da'}{\left|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\right|^3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}') + \int \frac{\rho dv'}{\left|\mathbf{r}-\mathbf{r}'\right|^3}(\mathbf{r}-\mathbf{r}')\right]$$

UCM

F II

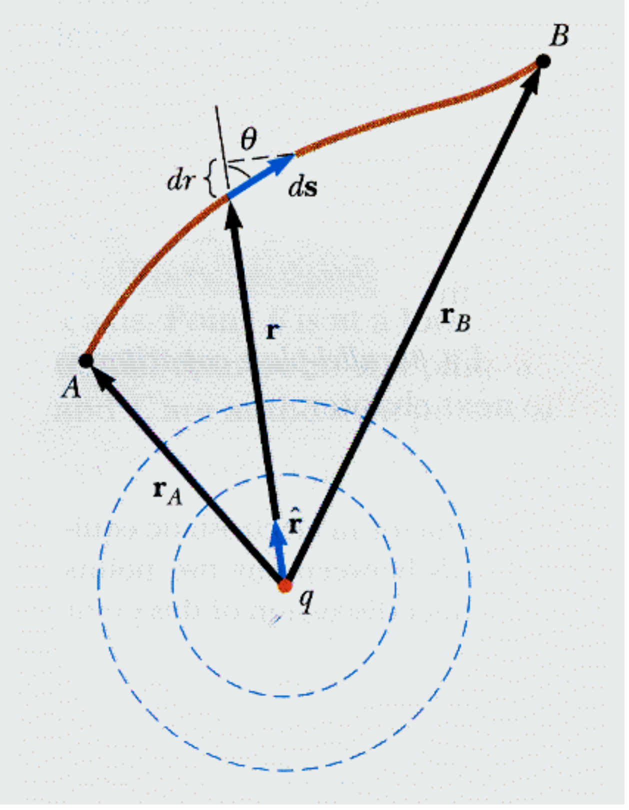
Teorema de Gauss



$$\oint_S \mathbf{E}.\mathbf{n}da = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int_S \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}'}{\left|(\mathbf{r}-\mathbf{r}')^3\right|}.\mathbf{n}da = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\oint_S d\Omega = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Potencial eléctrico

F II



$$-\int_A^B \mathbf{E}.d\mathbf{l} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right] = V_B - V_A$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

El campo eléctrico es conservativo

Relación entre el campo y el potencial

F II

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x}dx + \frac{\partial V}{\partial y}dy + \frac{\partial V}{\partial z}dz = -\mathbf{E}.d\mathbf{l} = -\left(E_x dx + E_y dy + E_z dz\right)$$

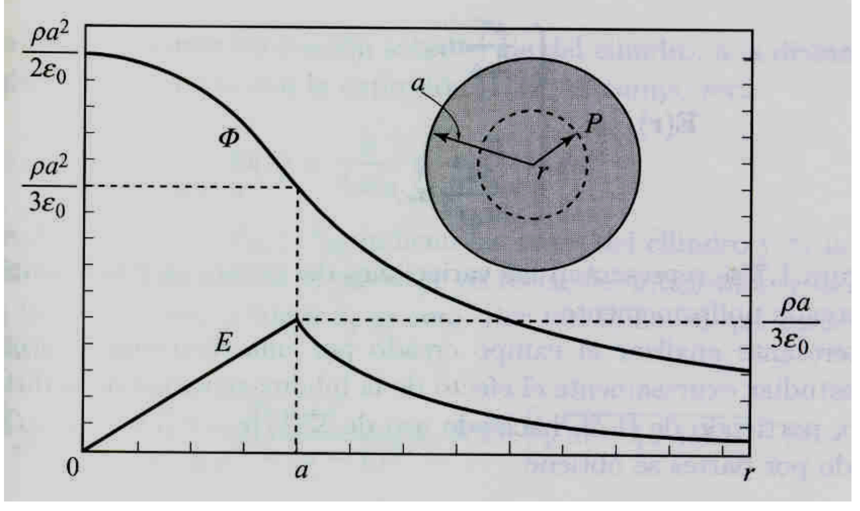
$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, E_z = -\frac{\partial V}{\partial z}; \mathbf{E} = -\nabla V$$

El campo es menos el gradiente del potencial

Cálculo de campos

F II

Esfera uniformemente cargada



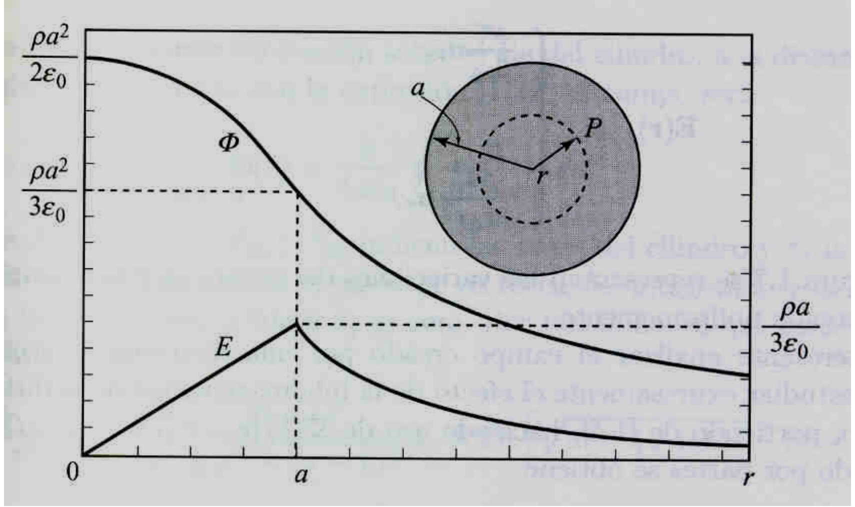
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \dfrac{\rho r}{3\varepsilon_0}\mathbf{u}_r, r < a \\ \dfrac{\rho a^3}{3\varepsilon_0 r^2}\mathbf{u}_r, r > a \end{cases}$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \begin{cases} \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}\left(\dfrac{a^2}{2} - \dfrac{r^2}{6}\right), \ r < a \\ \dfrac{\rho\, a^3}{3\varepsilon_0 r}, r > a \end{cases}$$

Cálculo de potenciales

F II

Esfera uniformemente cargada



$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \begin{cases} \dfrac{\rho r}{3\varepsilon_0}\mathbf{u}_r, r < a \\ \dfrac{\rho a^3}{3\varepsilon_0 r^2}\mathbf{u}_r, r > a \end{cases}$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \begin{cases} \dfrac{\rho}{\varepsilon_0}\left(\dfrac{a^2}{2} - \dfrac{r^2}{6}\right), \; r < a \\ \dfrac{\rho\, a^3}{3\varepsilon_0 r}, r > a \end{cases}$$

UCM

F II

Representaciones gráficas

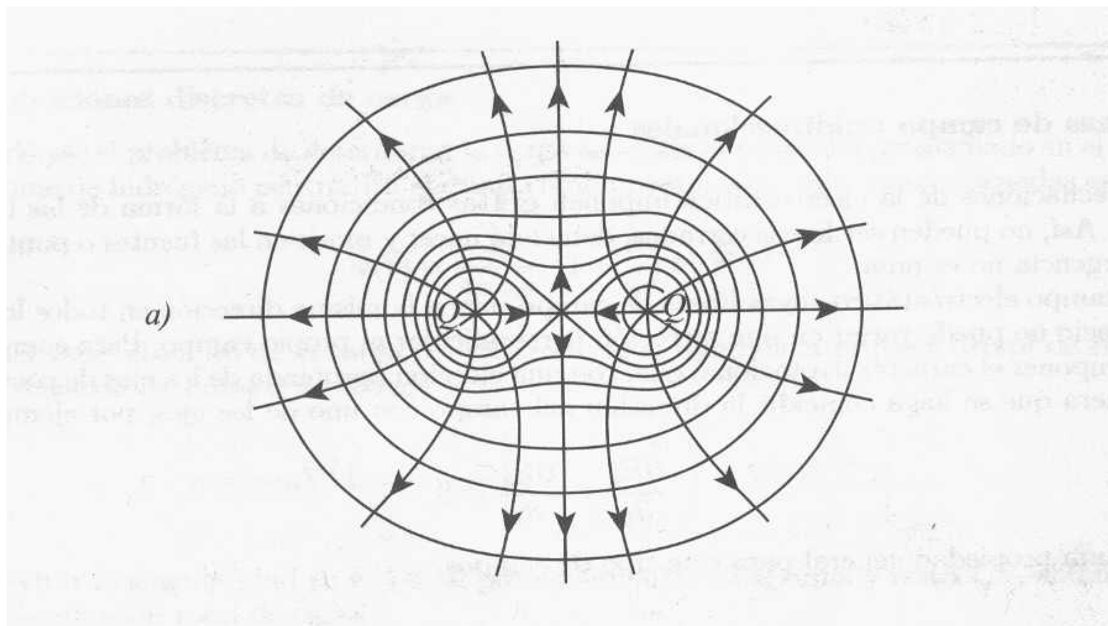
Información cualitativa y cuantitativa de los campos

Información cualitativa y cuantitativa de potenciales y campos

Representaciones gráficas

F II

Dos cargas puntuales iguales

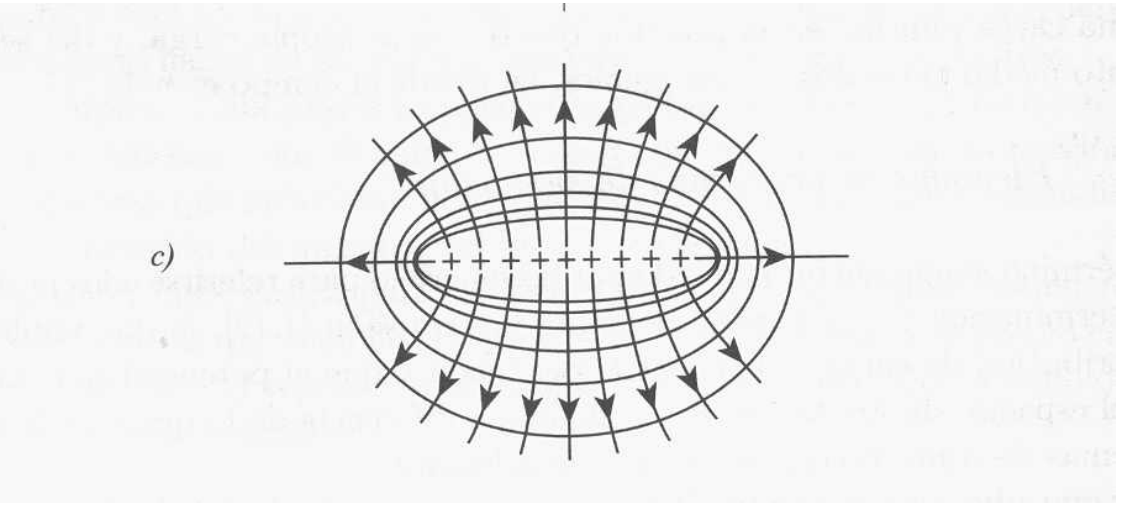


Equipotenciales y líneas de campo

Representaciones gráficas

F II

Línea cargada uniformememnte



Equipotenciales y líneas de campo

Formulación integral del campo eléctrico

F II

1ª Ecuación

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

Propiedad intrínseca del campo: conservativo
Fuerza central

2ª Ecuación

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} da = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Relación campo-fuentes
Ley inversa cuadrado de la distancia

F II

Energía potencial eléctrica

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

$$\int_A^B q'\mathbf{E}.d\mathbf{l} = q'\left(V_A - V_B\right) = U_A - U_B$$

$$U = qV$$

Energía potencial eléctrica

F II

$$U = \sum_i \frac{1}{2} q_i V_i + \frac{1}{2}\int_L \lambda V dl + \frac{1}{2}\int_A \sigma V da + \frac{1}{2}\int_V \rho V dv$$

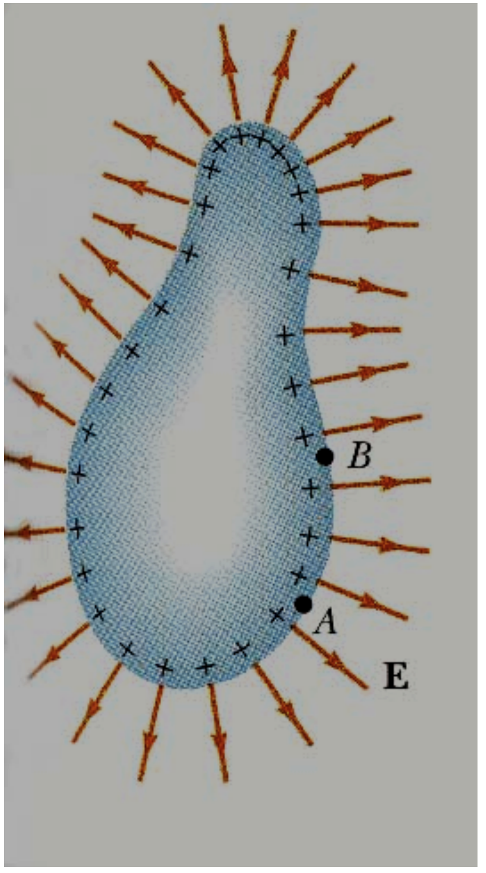
Energía localizada en las cargas

Conductores en equilibrio electrostático

F II

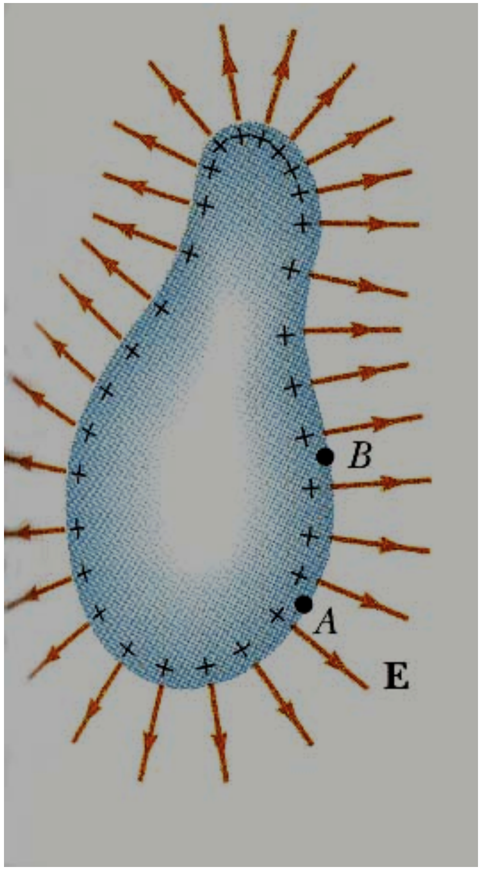
Campo nulo en su interior
Carga neta sobre superficie
Volumen equipotencial
Campo en sus proximidades

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

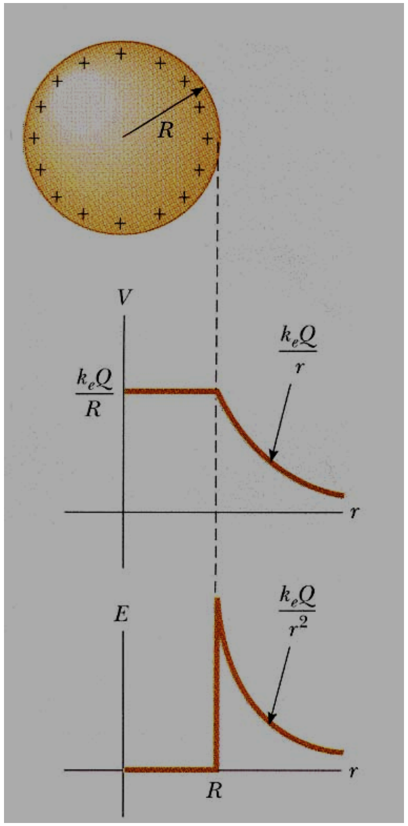


Conductores

F II



Conductor arbitrario



Esfera conductora

Capacida y energía

F II

Capacidad de un conductor

Esfera de radio a

$$C = \frac{q}{V} = 4\pi\varepsilon_0 a$$

Capacidad de un condensador: dos conductores con +Q y –Q a los potenciales V y 0

$$C = \frac{q}{V}$$

Energía de un condensador

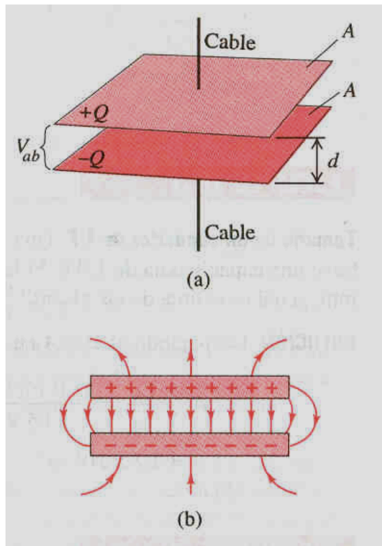
$$U = \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

Energía “localizada” en las cargas

Condensadores

F II

Plano



$$V = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma S}{V} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

$$U = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{A}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 A d$$

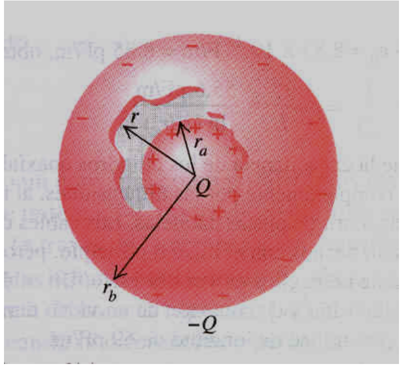
$$w = \text{densidad volúmica de energía} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2$$

Energía localizada en el campo

Condensadores

F II

Esférico



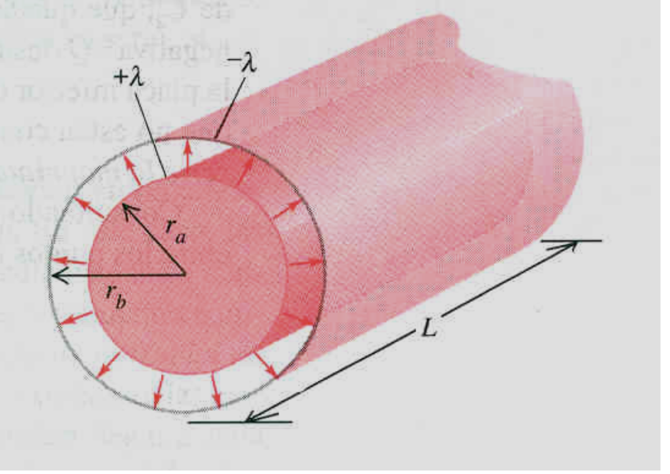
$$V = \int_a^b \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{b-a}$$

Condensadores

F II

Cilíndrico



$$V = \int_a^b \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{b}{a}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\lambda l}{V} = 2\pi\varepsilon_0 \frac{l}{\ln\frac{b}{a}}$$

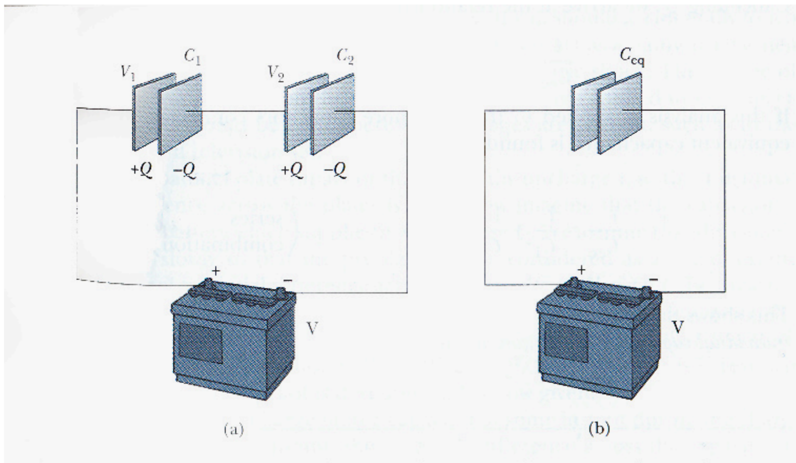
Asociación de condensadores

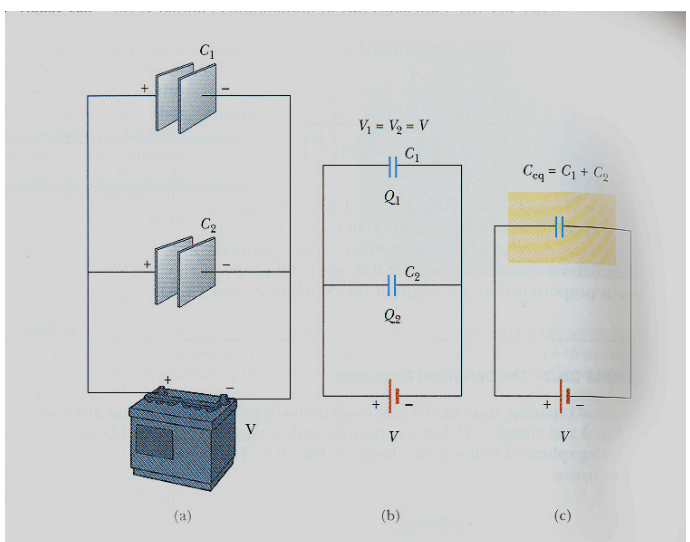
F II

- **Serie**

  Comparten carga

  Distribuyen tensión





- **Paralelo**

  Comparten tensión

  Distribuyen carga

UCM

Asociación de condensadores

F II

- Serie
  - Comparten carga
  - Distribuyen tensión

$$\frac{1}{C_T} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

- Paralelo
  - Comparten tensión
  - Distribuyen carga

$$C_T = \sum_i C_i$$

Movimiento de cargas en un campo eléctrico

F II

Típico problema de dinámica

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} = \frac{q}{m}\mathbf{E}$$

Leyes de conservación

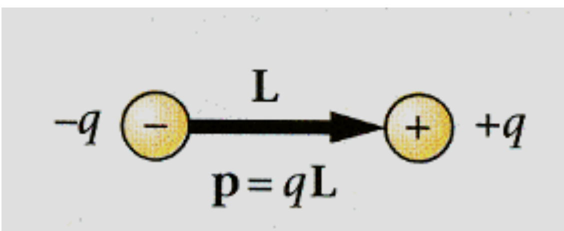
$$qV_A = qV_B + \frac{1}{2}mv^2$$

UCM

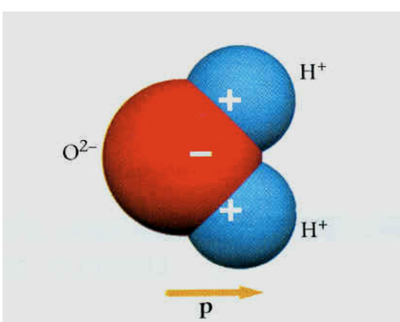
F II

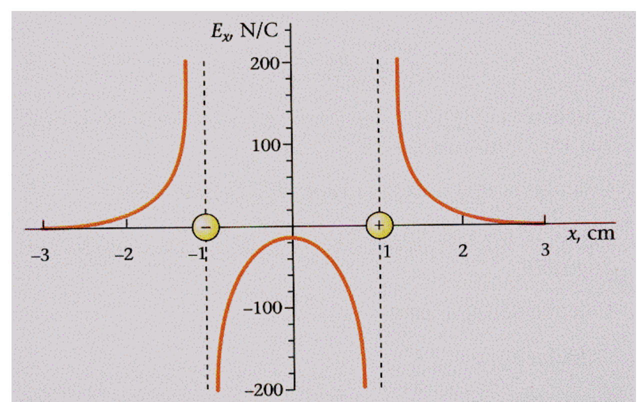
El dipolo eléctrico

Campo y potencial de un dipolo



$$V \propto \frac{p}{r^2}, \quad E \propto \frac{p}{r^3}$$

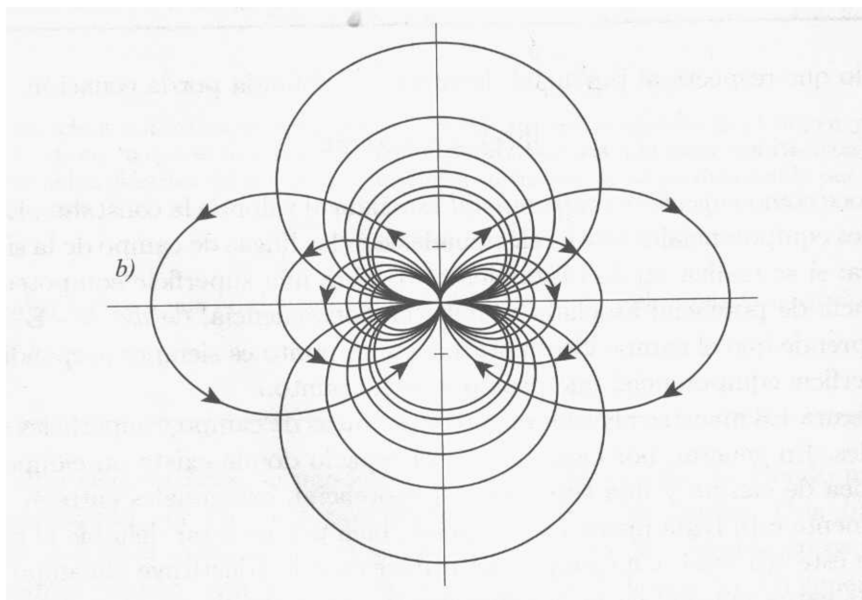




Representaciones gráficas

F II

Dipolo puntual



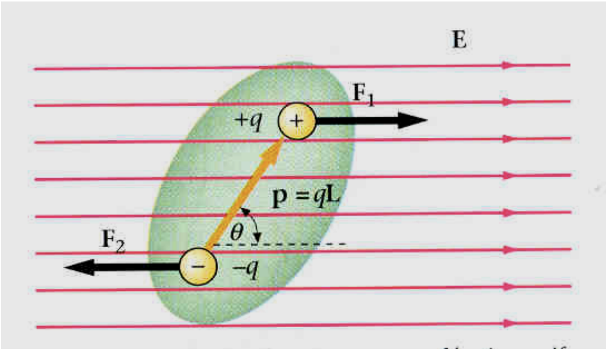
Equipotenciales y líneas de campo

UCM

F II

El dipolo eléctrico

Interacción campo-dipolo



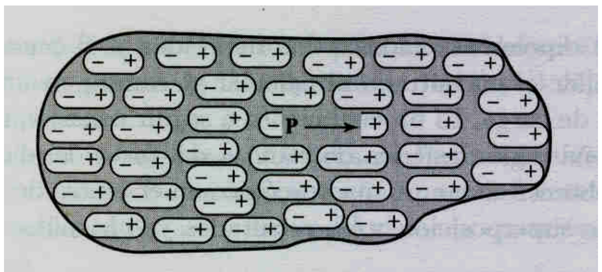
$$\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$$

$$U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E} = -pE\cos\theta$$

UCM

Dieléctricos

F II



$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}$$

$$\mathbf{P} = \frac{d\mathbf{p}}{dv} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$$

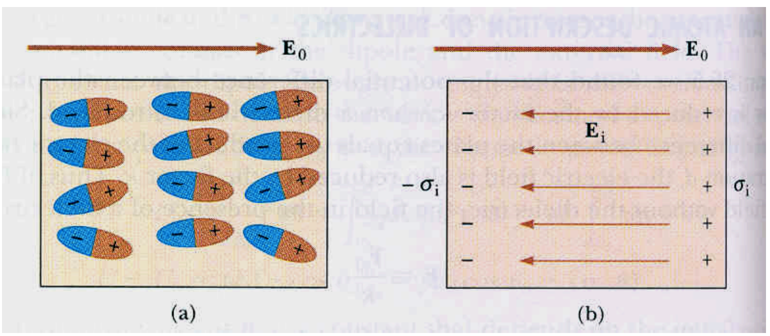
- **Estructura atómica-molecular de la materia**
  - **Centros carga positiva y negativa**
- **El dipolo eléctrico como ente puntual en aislantes**
- **Respuesta de un dieléctrico a un campo E. Polarizabilidad α**
- **Vector polarización P**
- **Susceptibilidad eléctrica χ_e**

UCM

Extensión del vacío a dieléctricos

F II

Condensador plano-paraleo



- **Dato experimental: $C_0 \Rightarrow \varepsilon_r C_0$**
- **Equivalencia en carga al estado de polarización**

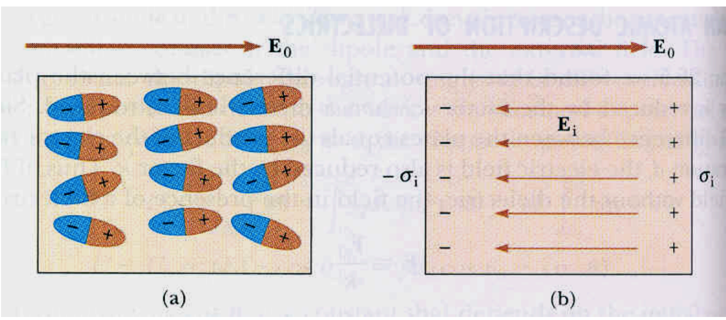
$$\sigma_P = \mathbf{P}\cdot\mathbf{n}, \quad E = \frac{\sigma + \sigma_P}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\left(1+\chi_e\right)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = \frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

$\varepsilon_r = 1 + \chi_e$, permitividad relativa $\quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, permitividad absoluta

UCM

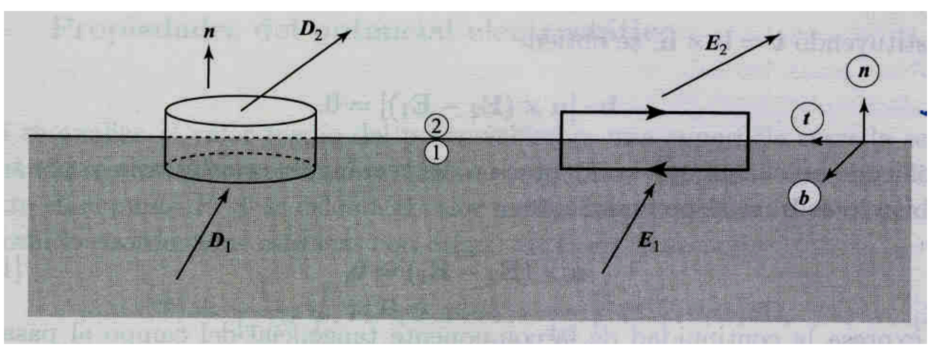
F II

Fronteras entre dieléctricos



$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \sigma\, \mathbf{n}$$

$$P = \frac{dp}{dv}$$



$$\mathbf{n} \cdot \left(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1\right) = \sigma,$$

$$\mathbf{t} \cdot \left(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1\right) = 0$$

UCM

F II

Corriente eléctrica

Densidad de corriente j. Ley de Ohm

$$\mathbf{j} = nq\mathbf{v}_d = \sigma\mathbf{E}$$

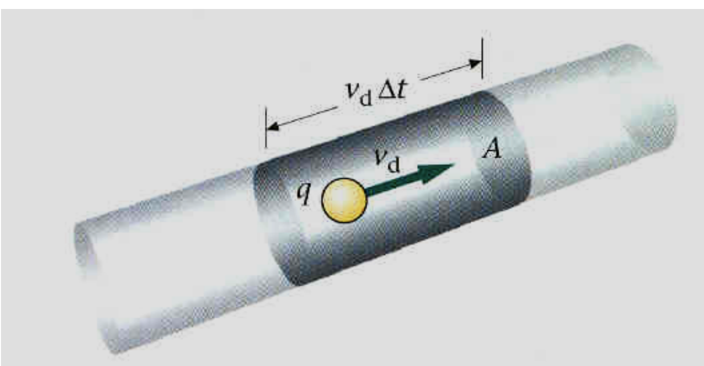
Intensidad de corriente I

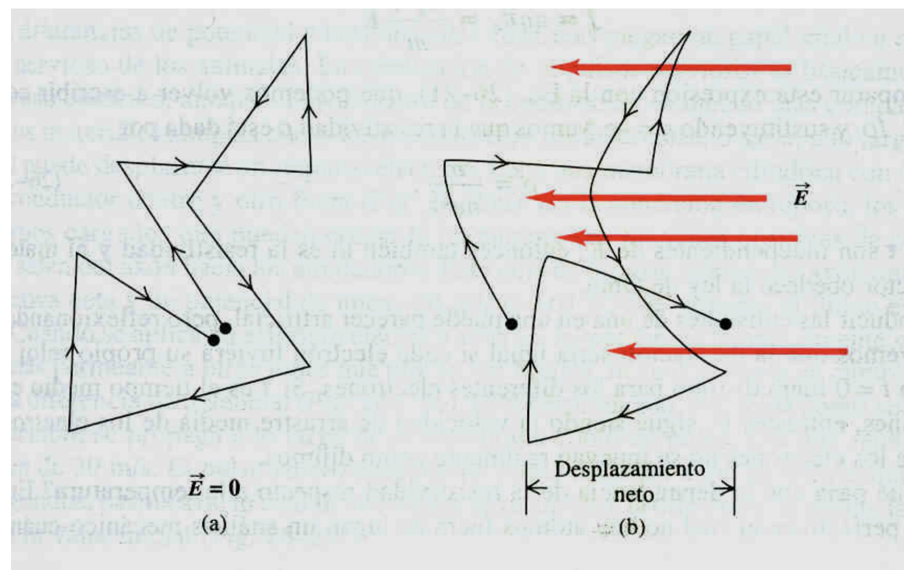
$$I = \int_A \mathbf{j} \cdot \mathbf{n}\, da$$

UCM

F II

Corriente eléctrica

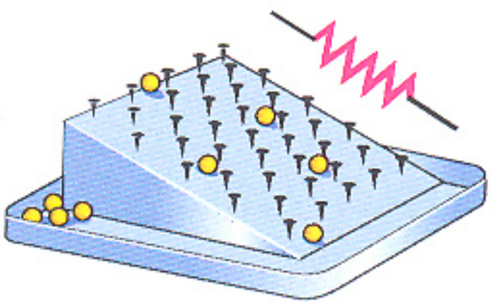




Fuerza electromotriz

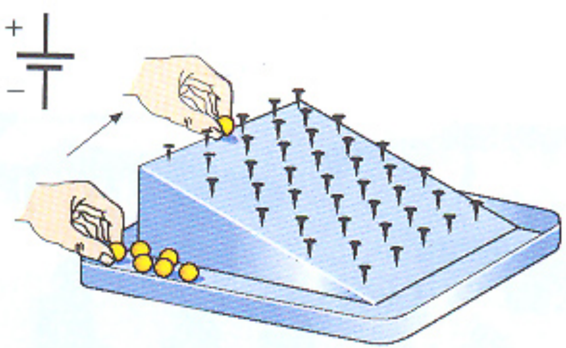
F II

Analogía mecánica R y ε



(a)

Resistencia



(b)

Fuerza electromotriz

UCM

F II

Corriente eléctrica

Fuerza electromotriz

$$\mathcal{E} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Resistencia de una barra conductora

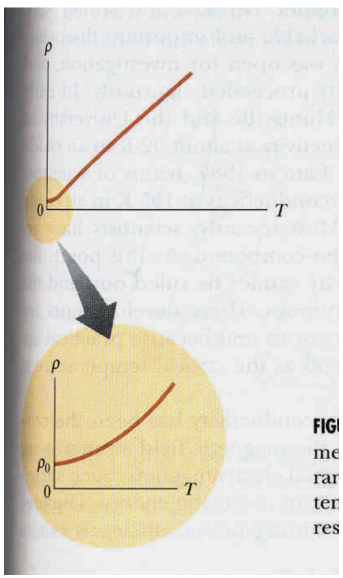
$$\Delta V = RI, \text{ con } R = \frac{1}{\sigma}\frac{l}{A} = \rho\frac{l}{A}$$

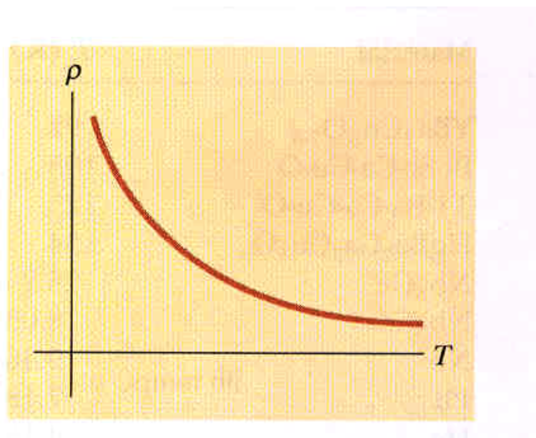
Ley de Ohm macroscópica

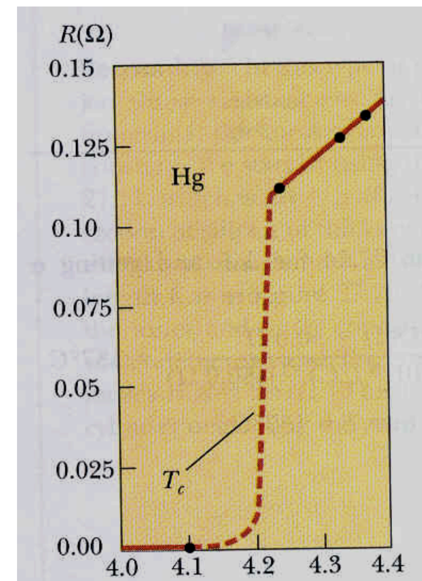
Comportamiento con la temperatura

F II

$$\rho = \rho_0\left[1 + \alpha\left(T - T_0\right)\right]$$







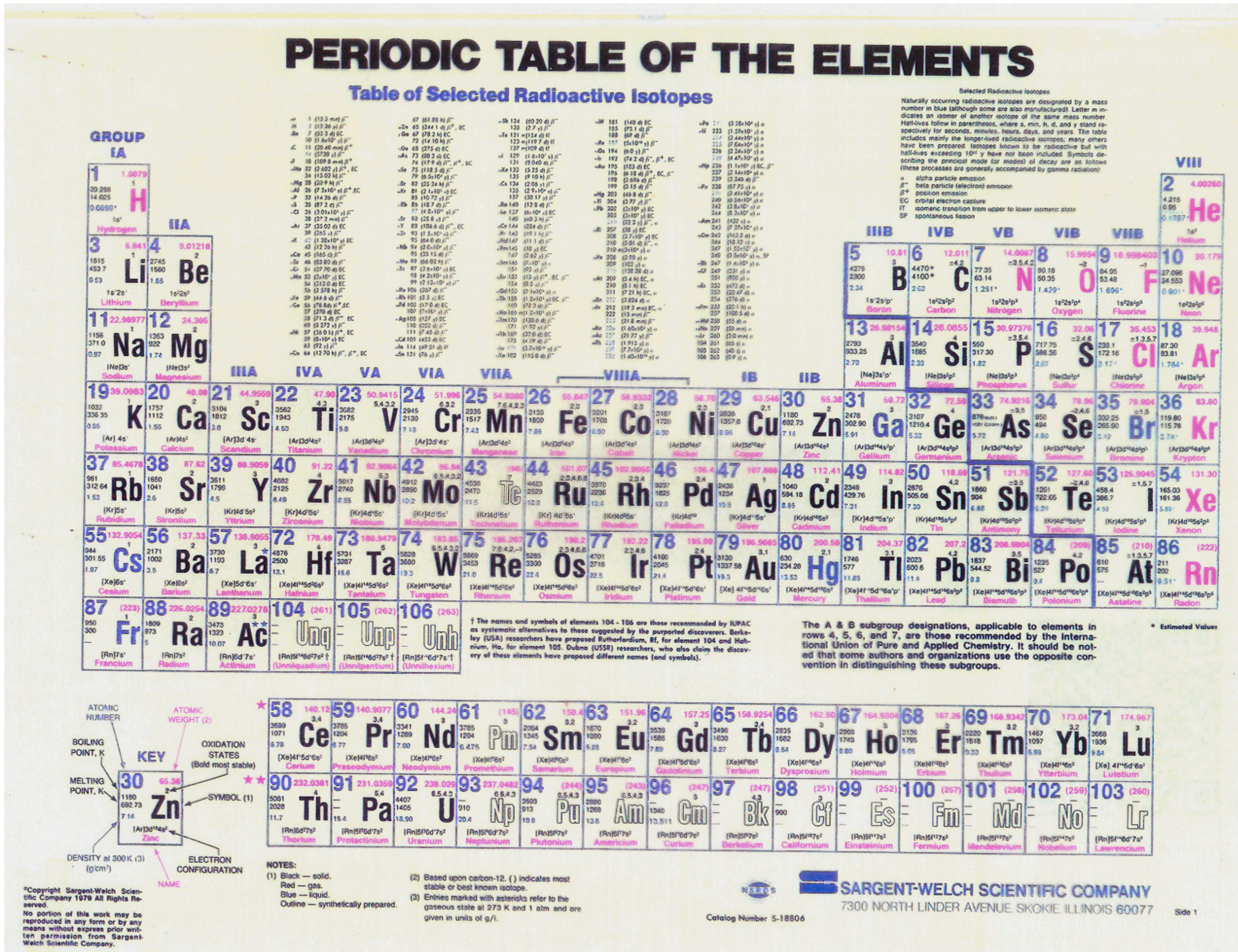
Conductor **Semiconductor** **Superconductor**

Propiedades eléctricas

F II

Configuración electrónica

Estructura cristalina



UCM

F II

Relaciones energéticas

Potencia suministrada por una batería

$$P_b = \mathcal{E} I$$

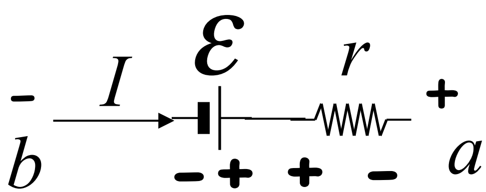
Potencia disipada por una resistencia

$$P_R = \Delta V I = R I^2 = \frac{V^2}{R}$$

Generadores/Motores

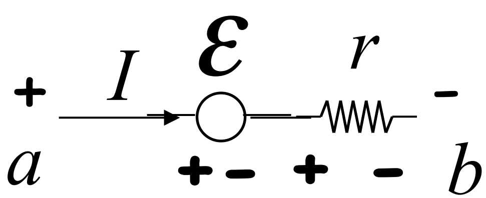
F II

Bateria: energía química ➡ energía eléctrica



$$V_a - V_b = \varepsilon - rI$$

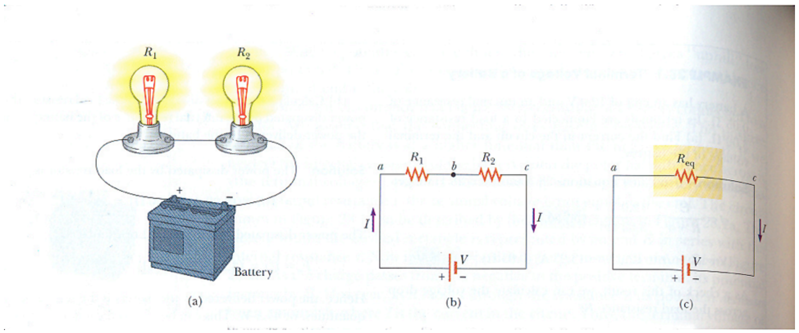
Motor: energía eléctrica ➡ energía mecánica



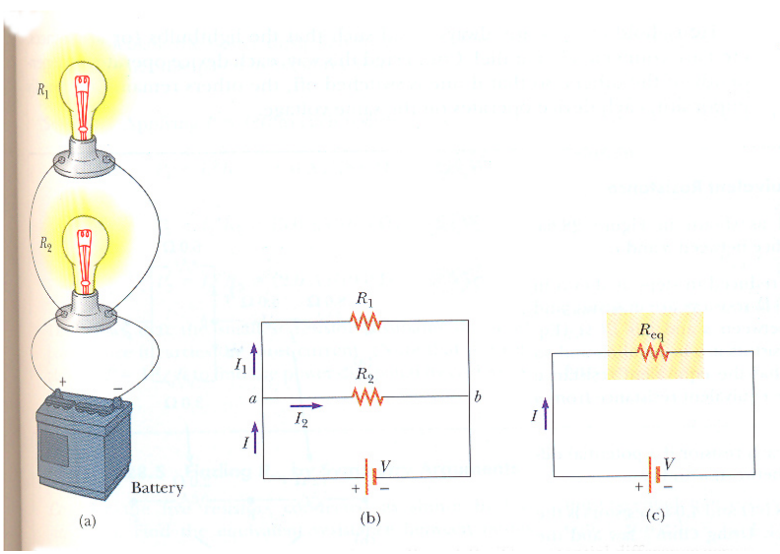
$$V_a - V_b = \varepsilon + rI$$

Asociación de resistencias

F II



- Serie
  - Comparten corriente
  - Distribuyen tensión



- Paralelo
  - Comparten tensión
  - Distribuyen corriente

Asociación de resistencias

F II

$$R_T = \sum_i R_i$$

- **Serie**
  - **Comparten corriente**
  - **Distribuyen tensión**

$$\frac{1}{R_T} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

- **Paralelo**
  - **Comparten tensión**
  - **Distribuyen corriente**

UCM

Circuitos de c.c.

F II

Leyes de Kirchhoff

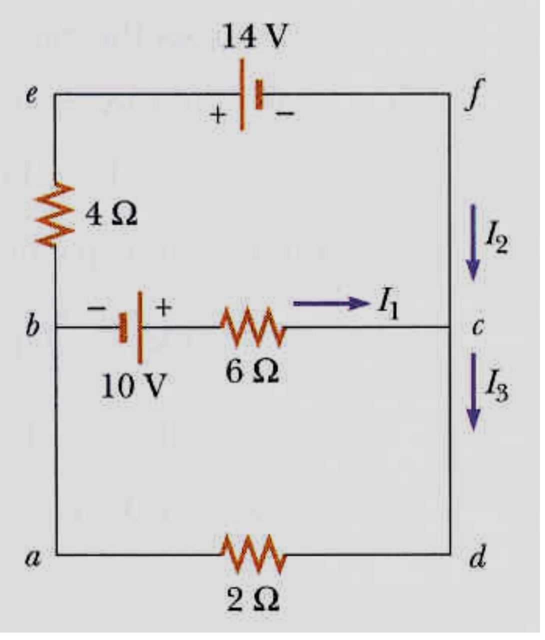
1ª Ley de los nudos $$\sum_j I_j = 0$$

2ª Ley de las mallas $$\sum \Delta V = 0$$

UCM

F II

Circuitos de c.c.



$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

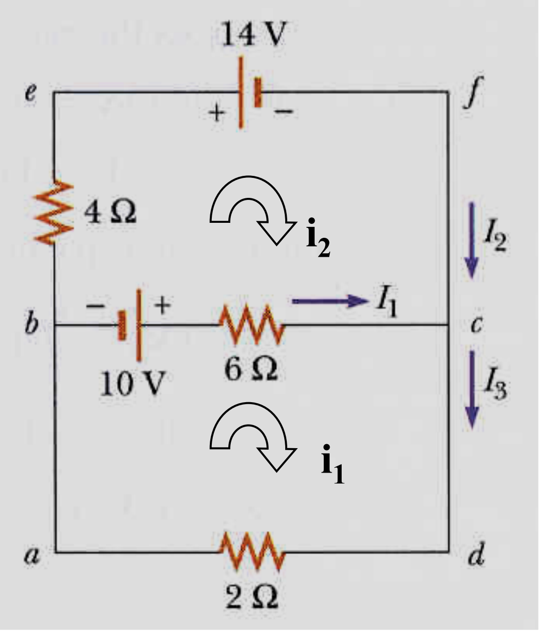
$$10 - 6I_1 - 2I_3 = 0$$

$$-14 - 10 + 6I_1 - 4I_2 = 0$$

$$I_1 = 2A,\ I_2 = -3A,\ I_3 = -1A$$

Método de Mallas

F II



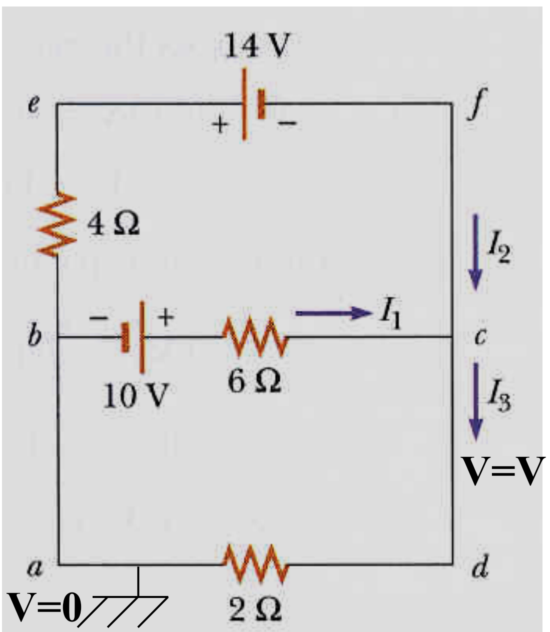
$$10 = 8i_1 - 6i_2$$

$$-24 = -6i_1 + 10i_2$$

$$i_1 = -1A,\ i_2 = -3A$$

Método de Nudos

F II



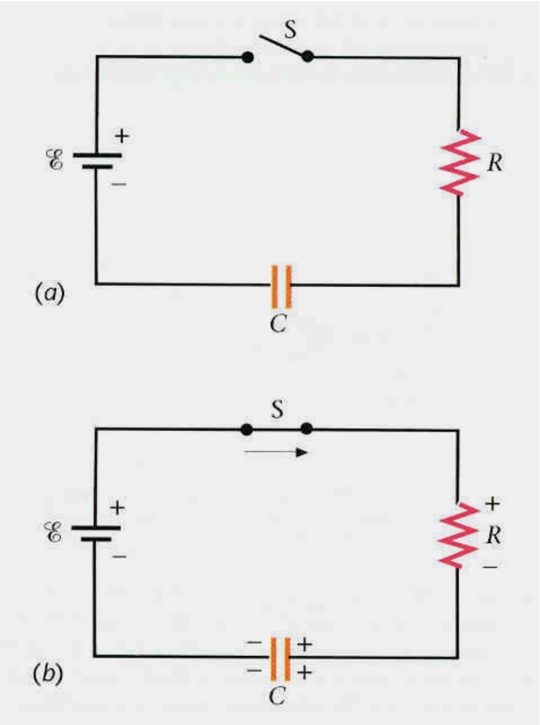
$$\frac{V+14}{4}+\frac{V-10}{6}+\frac{V}{2}=0$$

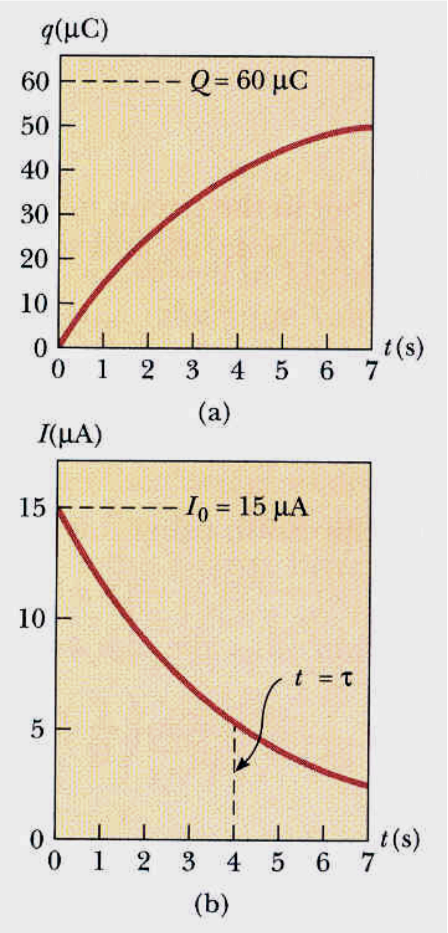
$$V=-2\text{Voltios}$$

UCM

FF II

Circuitos R-C





UCM

Circuitos R-C

FF II

Ley de las mallas

$$\mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0, \quad \frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Solución ec. diferencial

$$q(t) = C\mathcal{E}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC}$$