

*Unidad 4*

---

J.M.L.C. - Chena - IES Aguilar y Cano

# Interacción electromagnética

Campo eléctrico

---

[chenalc@gmail.com](mailto:chenalc@gmail.com)

# Campo eléctrico

Tales de Mileto (600 a.C.) observó la propiedad del ámbar de atraer pequeños cuerpos cuando se frotaba. Ámbar en griego es *electron* → **ELECTRICIDAD**.

En *Magnesia* existía un mineral que tenía la propiedad de atraer, sin frotar, materiales de hierro. De esta tierra toma el nombre dicho mineral (magnetita) y de ahí proviene **MAGNETISMO**.

Pierre de Maricourt (s. XIII); William Gilbert (1544 – 1603); Benjamin Franklin (1706 – 1790); Charles Augustin Coulomb (1736 – 1806); Alessandro Volta (1745 – 1827); Hans Christian Oersted (1777 – 1851); André Marie Ampère (1775 – 1836); Michel Faraday (1791 – 1867). **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879) unificó matemáticamente ambos fenómenos mediante las ecuaciones que llevan su nombre y que son comparables en importancia a las leyes de Newton de la dinámica.

# Campo eléctrico

La carga eléctrica que se encuentra en reposo en los cuerpos se denomina estática. Es la que se encuentra presente en las nubes de tormenta. Atrae objetos ligeros; estos, si están cargados, se repelen o se atraen entre sí, etc.

Los cuerpos se pueden electrizar por:

- Fricción (frotamiento)
- Contacto.

La carga eléctrica es la propiedad de la materia que señalamos como causa de de la interacción electromagnética (\*).

(\*) Cuando la carga eléctrica se mueve surgen los fenómenos magnéticos.

# Campo eléctrico

## Propiedades de la carga eléctrica

- La carga eléctrica está cuantizada.
- Existen dos tipos de carga: **positiva** y **negativa**.
- La carga eléctrica se conserva.

*La unidad de carga eléctrica en S.I. es el **culombio** (C), equivalente a la carga de  $6,242 \cdot 10^{18}$  electrones.*

De esta forma, la **unidad de carga elemental** ( $e$ ) vale:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

# Campo eléctrico

## Ley de Coulomb

La fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas es directamente proporcional al producto de ellas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Matemáticamente:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La constante  $k$  en el vacío vale:  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$

La constante  $k$  depende del medio (diferencia con la ley de Newton de la gravitación) y suele expresarse en función de otra constante denominada *permitividad eléctrica del medio*,  $\varepsilon$

$$k = \frac{1}{4 \pi \varepsilon} \quad \text{Si las cargas están en el vacío, } \varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

# Campo eléctrico

## Ejercicios

Compara la fuerza de repulsión eléctrica entre dos protones situados en el vacío con la fuerza de atracción gravitatoria que actúa entre ellos.

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ U.I.}; K = 9 \cdot 10^9 \text{ U.I.}$$

La fuerza entre dos partículas cargadas que se encuentran separadas entre sí 10 cm es de 1620 N. Si el valor de una de las cargas es el doble que el de la otra, calcula el valor y el signo de cada carga.

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ U.I.}$$


# Campo eléctrico

Vectorialmente:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$



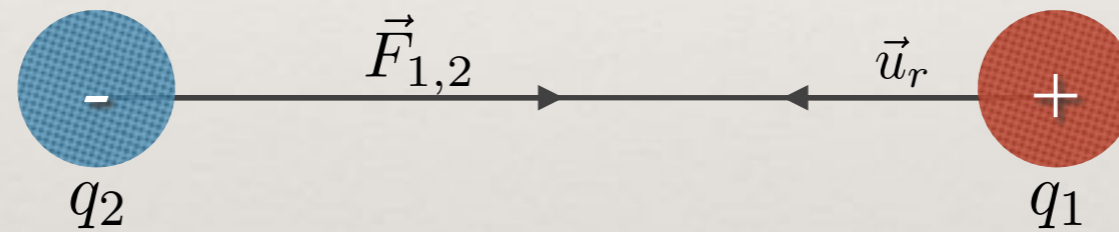
Como  $\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r}$


$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$


# Campo eléctrico

Vectorialmente:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}_r$$



Como  $\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r}$


$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$



# Campo eléctrico

## Ejercicio

Dos pequeñas bolas, de 10 g de masa cada una de ellas, están suspendidas del mismo punto mediante sendos hilos de 1 m de longitud cada uno. Si al cargar las bolitas con la misma carga eléctrica, los hilos se separan formando un ángulo de  $10^\circ$ , determina el valor de la carga eléctrica.

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}; g = 10 \text{ m s}^{-2}$$

# Campo eléctrico

## Principio de superposición

La fuerza de interacción entre dos cargas puntuales no varía en presencia de otras cargas.

La fuerza resultante que actúa sobre una carga es igual a la suma vectorial de las fuerzas individuales que sobre dicha carga ejercen las demás.

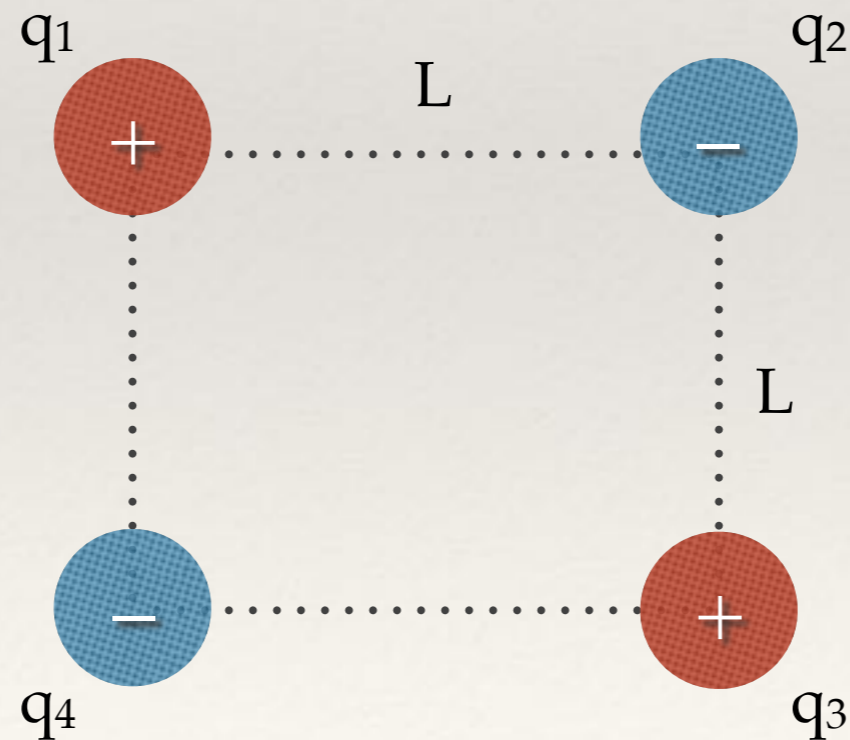
$$\vec{F}_{total} = \sum_{i=1}^{n-1} k \frac{q_i q_n}{r_{i,n}^2} \vec{u}_r$$

# Campo eléctrico

## Ejercicio

Las cuatro partículas de la figura están fijas en los vértices de un cuadrado de lado  $L = 30$  cm. Sus cargas son  $q_1 = q_3 = 1 \mu\text{C}$  y  $q_2 = q_4 = -1 \mu\text{C}$ . Determina la fuerza eléctrica que actúa sobre  $q_1$ .

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$



# Campo eléctrico

---

## Ejercicio

Calcula la fuerza electrostática que una carga  $q_1 = 5 \mu\text{C}$  situada en el punto  $P_1 (1, 3)$  ejerce sobre otra carga  $q_2 = 2 \mu\text{C}$  situada en  $P_2 (-2, 7)$ .

$K = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ ; las coordenadas están en centímetros.

# Campo eléctrico

Acción a distancia	Concepto de campo
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Se requiere la existencia de, al menos <i>dos cargas</i>. Un sola carga no genera acción alguna.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Se requiere la existencia de <i>un sola carga</i> para originar un campo.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ El espacio es el marco absoluto e invariable en el que sucede la interacción.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Son las distorsiones de las propiedades asociadas al espacio tiempo las responsables de la interacción.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ La <i>interacción es instantánea</i>.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Las <i>interacciones se propagan a la velocidad de la luz</i>.</li></ul>

*Campo eléctrico es la región del espacio cuyas propiedades son alteradas por la presencia de una carga eléctrica.*

# Campo eléctrico

## Concepto de campo

Enfoque	Definido por	Acción sobre una carga	Carácter
Dinámico	Intensidad del campo en cada punto	Fuerza sobre una carga	Vectorial
Energético	Potencial en cada punto	Energía potencial que adquiere una carga	Escalar

# Campo eléctrico

## Intensidad del campo eléctrico

O simplemente campo eléctrico en un punto,  $\vec{E}$ , es la fuerza que actúa sobre la unidad de *carga eléctrica testigo positiva* colocada en dicho punto.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^{\oplus}}$$

La unidad de intensidad del campo eléctrico en el S.I. es N/C

El campo eléctrico en un punto, originado por una carga eléctrica puntual es:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{u}_r$$

El campo eléctrico es un vector de **dirección** radial.

El **sentido** depende de la carga: si esta es positiva, el sentido es alejarse de ella; si es negativa, hacia la carga.

# Campo eléctrico

Conocido el campo eléctrico en un punto podemos conocer la fuerza que actuará sobre una carga,  $q'$ , al colocarla en dicho punto:

$$\vec{F} = q' \cdot \vec{E}$$

## Principio de superposición

La intensidad del campo eléctrico creado por un número cualquiera de cargas eléctricas es igual a la suma vectorial de los campos originados individualmente por cada una de las cargas.

$$\vec{E}_{res} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = k \left( \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{u}_r \right)$$



# Campo eléctrico

## Ejercicios

En el origen de coordenadas está situada una carga  $q_1 = +3 \mu\text{C}$  y en el punto  $(4, 0)$  otra carga  $q_2 = -3 \mu\text{C}$ . Determina: el vector campo eléctrico en el punto  $A(0, 3)$  y la fuerza que actúa sobre una carga  $q_3 = -6 \mu\text{C}$  colocada en el punto A.

En una región del espacio existe un campo eléctrico uniforme según  $\vec{E} = -10^3 \vec{i} \text{ N C}^{-1}$ . Un protón penetra en dicha región con una velocidad  $\vec{v} = 10^5 \vec{i} \text{ m s}^{-1}$ . Calcula:

- Su posición  $1 \mu\text{s}$  después de haber penetrado en esa región.
- Su velocidad en ese instante.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

# Campo eléctrico

---

## Líneas de campo o líneas de fuerza

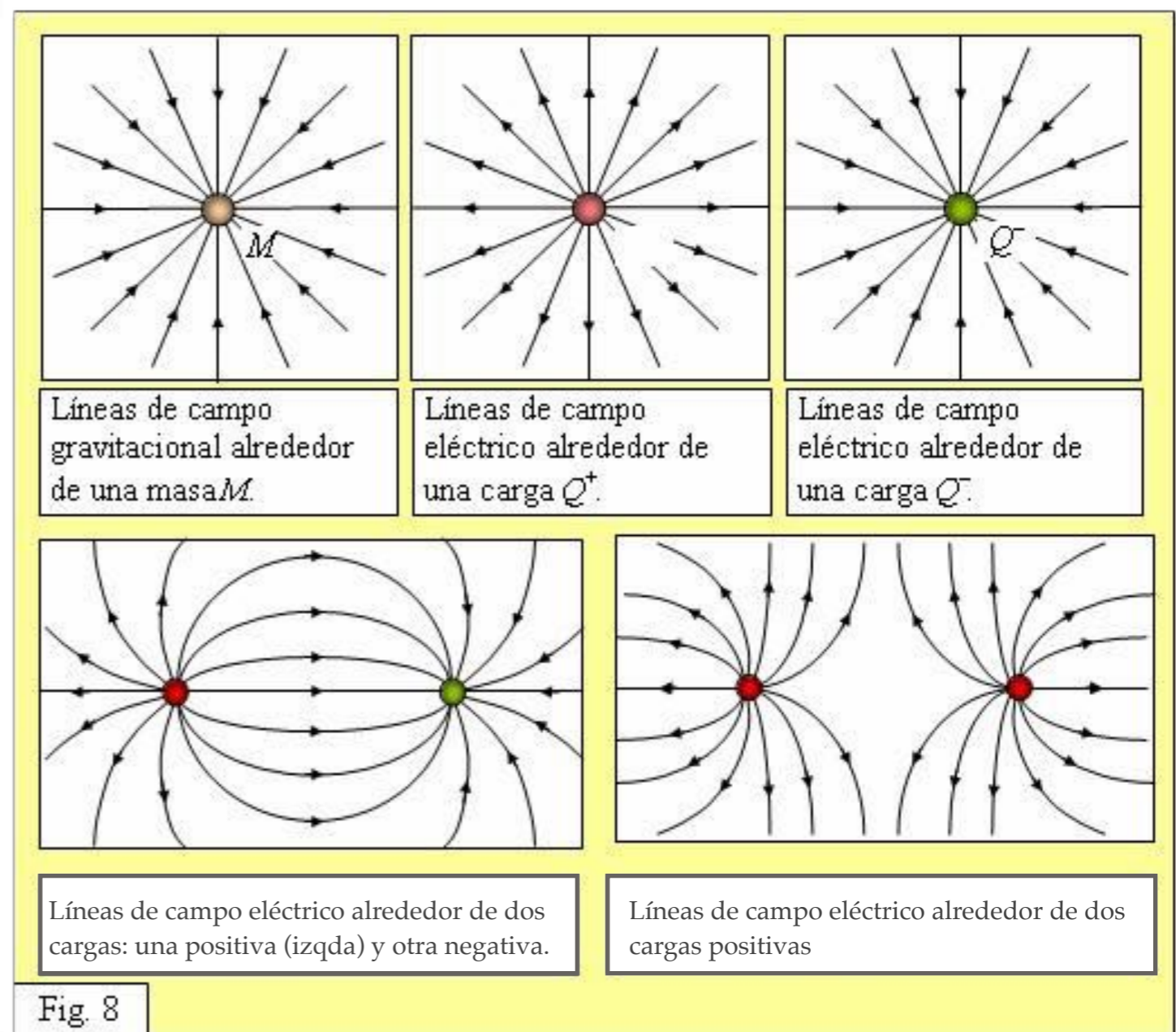
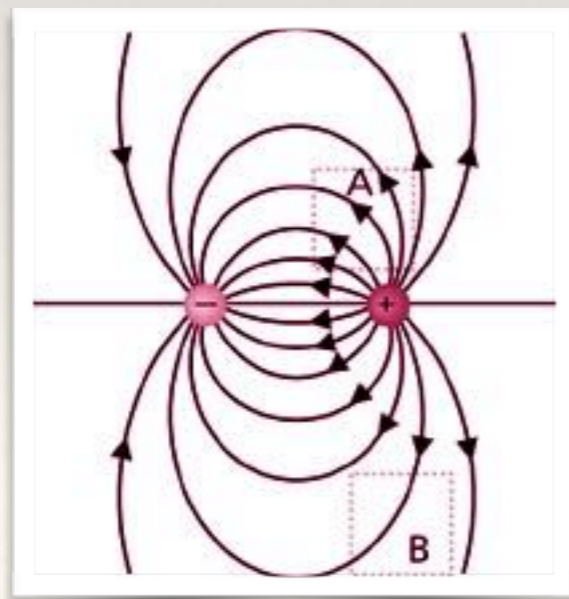
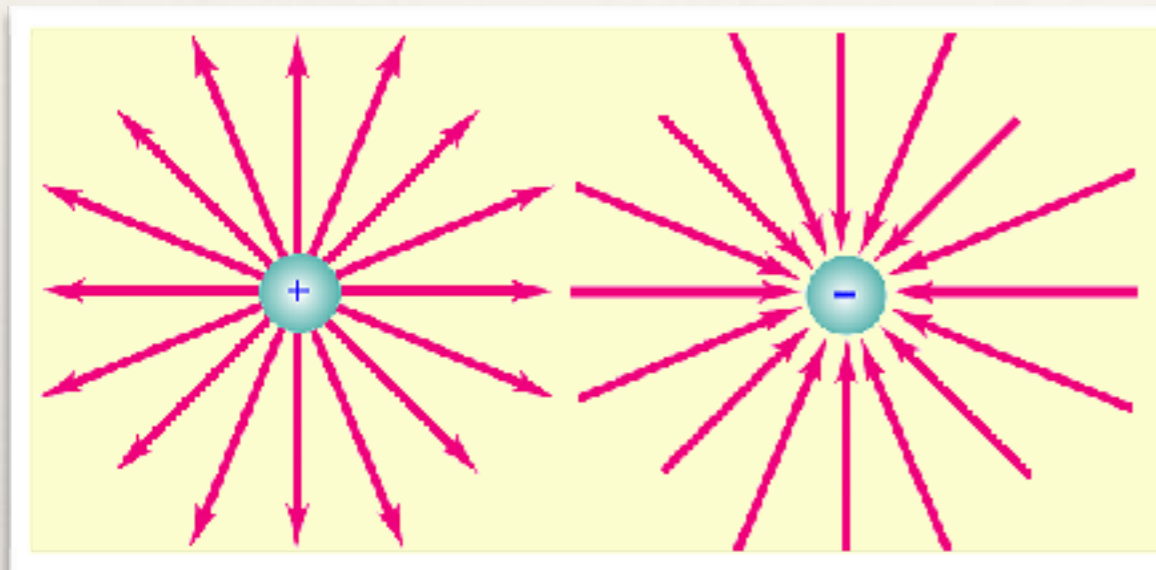
Las líneas de fuerza en el campo eléctrico, al igual que en el gravitatorio, constituyen una representación del campo vectorial.

Estas líneas cumplen las siguientes propiedades:

- Son abiertas. Nacen en las cargas positivas (fuentes). Mueren en las negativas (sumideros).
- Su número es proporcional a la intensidad del campo.
- El vector campo eléctrico es tangente a las líneas en cada punto.
- Nunca pueden cortarse dos líneas de campo (pues habría dos valores para el campo eléctrico en el punto de corte).

# Campo eléctrico

Las **líneas** se trazan de tal forma que su dirección y sentido coincidan en cada punto con los de la fuerza que actuaría sobre una **carga testigo positiva**.



# Campo eléctrico

## El campo eléctrico desde un enfoque energético

La fuerza eléctrica es *conservativa*, porque es central. Por tanto podemos asociar una *energía potencial* a una carga colocada en un campo eléctrico.

El trabajo que realiza sobre una carga cuando ésta se traslada de un punto a otro solo depende de la posición de dichos puntos y no de la trayectoria seguida.

El trabajo que realiza a lo largo de una trayectoria cerrada es nulo.

Si solo actúan fuerzas conservativas la energía mecánica de un cuerpo cargado se conserva.

Por tanto podemos definir una energía potencial (asociada a la posición) tal que:

$$W_{F_{cons}} = -\Delta E_p = E_{p0} - E_{pf}$$

# Campo eléctrico

Calculemos el trabajo que realiza la fuerza eléctrica cuando se traslada una carga,  $q$ , desde un punto A hasta otro punto B en presencia de otra carga  $Q$ :

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = k Q q \int_A^B \frac{1}{r^2} dr = k Q q \left( -\frac{1}{r} \right)_A^B$$

$$W = k Q q \left( -\frac{1}{r} \right)_A^B = k Q q \left( -\frac{1}{r_B} - \left( -\frac{1}{r_A} \right) \right) =$$

$$= k Q q \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = \frac{k Q q}{r_A} - \frac{k Q q}{r_B}$$

Al igual que pasaba con la fuerza gravitatoria, el trabajo que realiza la fuerza eléctrica es solo función de las posiciones inicial (A) y final (B); y no depende del camino.

# Campo eléctrico

Como  $W = -\Delta E_p = -(E_{p_B} - E_{p_A})$  comparando con la anterior:

$$\frac{k Q q}{r_A} - \frac{k Q q}{r_B} = -(E_{p_B} - E_{p_A}) = E_{p_A} - E_{p_B}$$

Y asociando términos:

$$E_{p_A} = \frac{k Q q}{r_A} \quad E_{p_B} = \frac{k Q q}{r_B}$$

$$E_p(r) = k \frac{Q q}{r}$$

Igual que la gravitatoria, la energía potencial eléctrica será nula en aquel punto donde la interacción sea nula, es decir en el infinito, ya que cuando  $r \rightarrow \infty$ ,  $E_p \rightarrow 0$ .

# Campo eléctrico

---

Ejercicio de aplicación teórica: Estudiemos el trabajo y el signo de la energía potencial en varios casos:

- ❖ Acercamos una carga a otra del mismo signo.
- ❖ Alejamos una carga de otra del mismo signo.
- ❖ Acercamos una carga a otra de distinto signo.
- ❖ Alejamos una carga de otra de distinto signo.

# Campo eléctrico

## Ejercicios

Dos cargas  $q_1 = 3 \mu\text{C}$  y  $q_2 = -6 \mu\text{C}$  están situadas en el vacío a una distancia de 2 m. Calcula la variación de la energía potencial y el trabajo realizado para separarlas hasta una distancia de 4 m. Interpreta el signo del resultado obtenido.

Sean dos cargas eléctricas puntuales de valor  $q_1 = -5 \text{ nC}$  y  $q_2 = 3 \text{ nC}$  separadas una distancia de 7 cm. Sean dos puntos  $A$  y  $B$  situados sobre el segmento definido por las dos cargas, el primero de ellos a 1 cm de la carga negativa y el segundo a 1 cm de la carga positiva. Si se abandona en reposo un electrón en el punto  $A$ , calcula la velocidad cuando pasa por el punto  $B$ .

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$



# Campo eléctrico

## Ejercicio

En el origen de coordenadas está situada una carga  $q_1 = +3 \mu\text{C}$  y en el punto  $A(4, 0)$  otra carga  $q_2 = -3 \mu\text{C}$ . Si las cargas están situadas en el vacío y las coordenadas se expresan en metros, determina el trabajo que realizan las fuerzas del campo para trasladar una carga  $q_3 = -6 \mu\text{C}$  desde el punto  $B(0, 3)$  hasta el punto  $C(3, 0)$ . Interpreta el signo obtenido.

# Campo eléctrico

## Energía potencial de un sistema de varias cargas

La energía potencial total del sistema es la suma llevada a cabo sobre todos los pares de partículas. Para tres cargas, por ejemplo:

$$E_p = E_{p_{1,2}} + E_{p_{1,3}} + E_{p_{2,3}} = k \left( \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}} + \frac{q_1 q_3}{r_{1,3}} + \frac{q_2 q_3}{r_{2,3}} \right)$$

El significado físico de ésta es que mide el trabajo necesario para construir dicho sistema (las cargas en sus posiciones), trayendo las cargas desde el infinito. O, por contra, la energía necesaria para destruir el sistema (llevar las cargas hasta el infinito desde las posiciones que ocupan en él).

# Campo eléctrico

## Potencial eléctrico

Para definir el campo desde un enfoque energético, establecemos como magnitud representativa del mismo el *potencial del campo*,  $V$ , *en un punto*, entendido como la energía potencial que tendría la unidad de carga testigo positiva colocada en ese punto.

Si  $q^{\oplus}$  es la carga testigo:

$$V(r) = \frac{E_p(r)}{q^{\oplus}} \quad \text{Unidad: J/C = V (voltio)}$$

Que para el caso de que sea una carga puntual,  $Q$ , la que cree el campo, este será:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

El campo definido en función del potencial es un *campo escalar*.

# Campo eléctrico

---

## Ejercicio

Una carga puntual de valor  $nq$  se coloca en el origen de coordenadas, mientras que otra carga de valor  $-q$  se coloca sobre el eje  $X$  a una distancia  $d$  del origen. Calcula las coordenadas del punto donde el campo eléctrico es nulo si  $n = 4$ . ¿Cuánto valdrá el potencial electrostático en ese punto?

# Campo eléctrico

Para varias cargas puntuales,  $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ , el potencial en un punto debido a todas ellas es la suma algebraica de los potenciales creados por cada una:

$$V_{res} = \sum_{i=1}^n V_i = k \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \dots + \frac{q_n}{r_n} \right) = k \left( \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \right)$$

La energía potencial que adquiere una carga  $q'$  colocada en dicho punto será:

$$E_p = q' \cdot V_{res}$$

# Campo eléctrico

## Ejercicio

Tres cargas,  $q_1 = 1 \mu\text{C}$ ,  $q_2 = -2 \mu\text{C}$  y  $q_3 = 3 \mu\text{C}$  están situadas en los vértices de un triángulo equilátero de lado  $l = 10 \text{ cm}$ . Calcula el potencial eléctrico en el centro del triángulo.

$$K = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

# Campo eléctrico

## Significado físico del potencial

El trabajo que realiza la fuerza eléctrica,  $F_e$ , (conservativa) es igual a la variación de energía potencial cambiada de signo. Si trasladamos una carga  $q$  desde el infinito hasta una distancia  $r$  de otra carga  $Q$ , esto será:

$$W_{F_e} = -k \frac{Qq}{r}$$

Este trabajo es igual y de distinto signo al que realizaría en el mismo trayecto una fuerza externa,  $F_{ext}$ , idéntica a la eléctrica pero de signo contrario:

$$W_{F_{ext}} = k \frac{Qq}{r} \quad \text{donde, dividiendo por } q \quad \frac{W_{F_{ext}}}{q} = k \frac{Q}{r}$$

El potencial en un punto resulta ser el trabajo externo que hay que realizar, para trasladar la unidad de carga positiva desde el infinito hasta el punto considerado.

# Campo eléctrico

## Diferencia de potencial entre dos puntos

Si en lugar de considerar el desplazamiento desde el infinito, consideramos que tiene lugar desde un punto **A** a otro **B**, podemos definir la diferencia de potencial (*ddp*) entre los dos puntos,  $(V_B - V_A)$  como el trabajo externo que debemos hacer para trasladar la unidad de carga positiva desde **A** hasta **B**.

$$\frac{W_{A \rightarrow B}}{q} = (V_B - V_A)$$

En este caso, la variación de energía potencial que experimenta una carga  $q$  que se traslada de **A** hasta **B** es:

$$E_p(B) - E_p(A) = q(V_B - V_A)$$



# Campo eléctrico

## Ejercicios

Un electrón se deja en reposo en el origen de coordenadas donde actúa un campo eléctrico uniforme de intensidad:  $\vec{E} = -400 \vec{i}$  N/C. Determina la diferencia de potencial entre el origen de coordenadas y el punto  $A(5, 0)$  cm. Calcula la velocidad del electrón cuando pasa por el citado punto  $A$ .

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Un protón que parte del reposo es acelerado por una diferencia de potencial de 10 V. Determina la energía que adquiere el protón expresada en electrón-voltios (eV) y su velocidad en m/s.

$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

# Campo eléctrico

La representación de un campo conservativo puede realizarse bien mediante las *líneas de fuerza*, bien mediante las *superficies equipotenciales*.

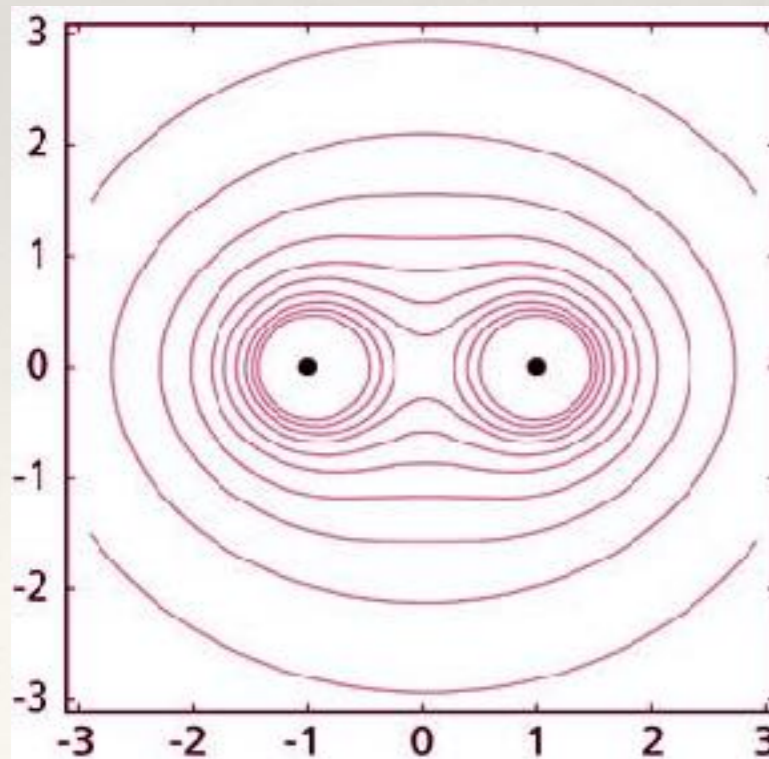
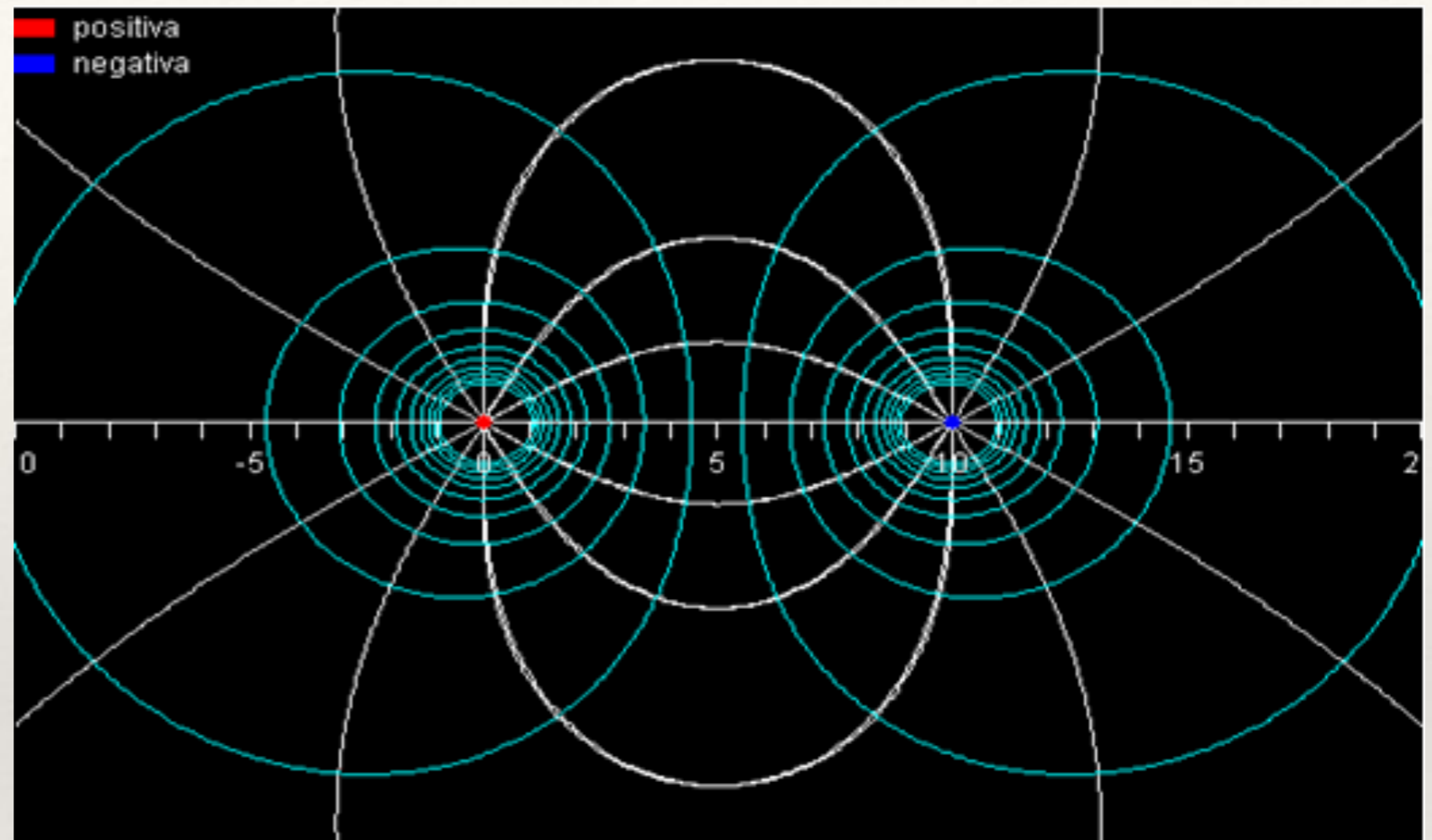
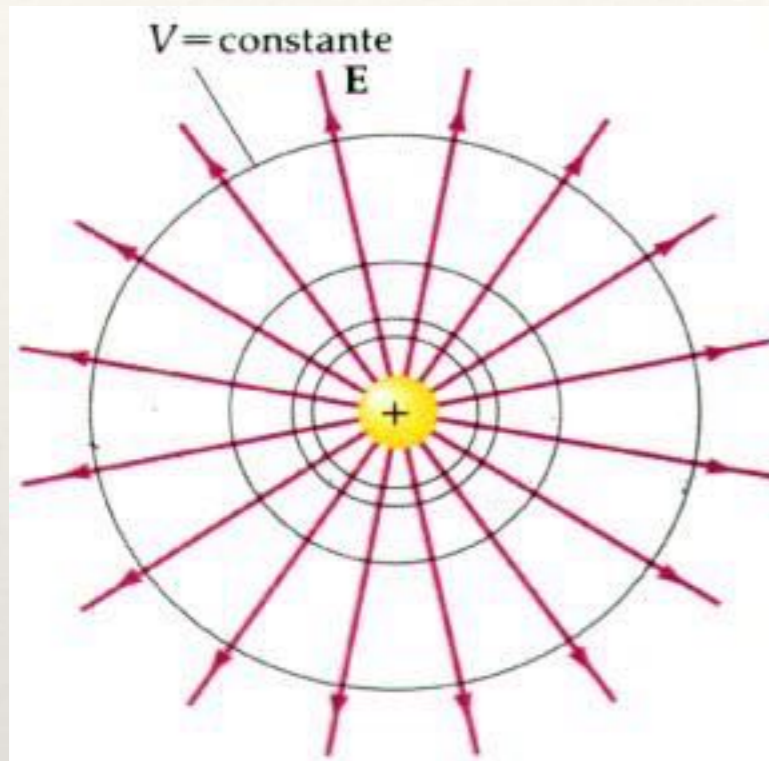
Una superficie equipotencial es aquella en que todos sus puntos se encuentran al mismo potencial; la diferencia de potencial entre dos cualesquiera de sus puntos es nula ( $\Delta V = 0$ ). Por tanto, cuando una carga se traslada por una superficie equipotencial el campo eléctrico no realiza ningún trabajo sobre ella.

$$W = q \cdot \Delta V = 0$$

De aquí se obtiene la consecuencia de que el vector campo es en todo punto perpendicular a la superficie equipotencial:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{r} = -q \cdot \Delta V$$

# Campo eléctrico



Practica aquí con dos cargas y distintos valores para ver la disposición de las líneas de campo y las superficies equipotenciales.

# Campo eléctrico

---

## Ejercicio

Dibuja las líneas de campo eléctrico y las superficies equipotenciales del campo eléctrico creado por una carga  $q = -4 \mu\text{C}$ .  
¿Qué distancia hay entre la superficie equipotencial de  $-12000 \text{ V}$  y la de  $-4000 \text{ V}$ ?

# Campo eléctrico

## Relación entre intensidad del campo eléctrico y potencial

Consideremos un campo eléctrico constante en la dirección del eje X:

$$\int_A^B E \cdot dr = E_x \int_A^B dx = -\Delta V$$

$$E_x(x_B - x_A) = -\Delta V$$

$$\Delta V = -E_x \cdot \Delta x$$

Para un desplazamiento infinitesimal (diferencial),  $dx$ :  $dV = -E_x dx$

Podemos, pues, conocer el valor del campo eléctrico en una dirección sin más que hacer:

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad \Rightarrow \quad \vec{E}_x = -\frac{dV}{dx} \vec{i} \quad \text{Unidad: V/m = N/C}$$

Expresión que además nos indica que el sentido del campo es el de los potenciales decrecientes.

# Campo eléctrico

## Campo eléctrico uniforme

Es aquel cuya intensidad es la misma en todos los puntos, por ejemplo el existente entre dos placas planas paralelas de distinto signo con la misma carga por unidad de superficie. La diferencia de potencial entre las placas es función de la distancia que hay entre ambas.

$$\int_A^B E \cdot dr = E_x \int_A^B dx = -\Delta V$$

$$E_x \cdot (x_B - x_A) = -\Delta V$$

$$V_B - V_A = -E \cdot d$$

Cuando una carga,  $q$ , se desplaza en un campo eléctrico uniforme desde A hasta B, varía su energía potencial, de modo que:

$$E_p(B) - E_p(A) = -q \cdot E \cdot d$$

# Campo eléctrico

## Ejercicio

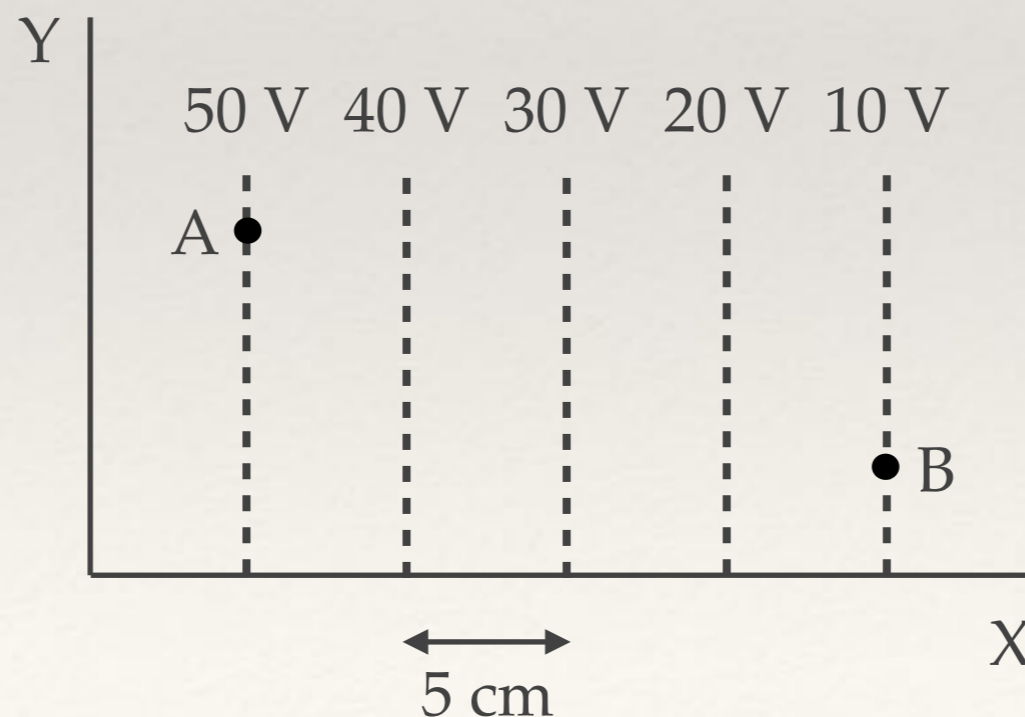
Una carga de  $2 \mu\text{C}$  está en reposo en el punto  $O (0, 0)$ . Se aplica un campo eléctrico uniforme de  $500 \text{ N C}^{-1}$  en el sentido positivo del eje  $OY$ .

- a) Describe el movimiento seguido por la partícula y la transformación de energía que tiene lugar a lo largo del mismo.
- b) Calcula la diferencia de potencial entre los puntos  $O$  y  $P(0, 2) \text{ m}$  y el trabajo realizado para desplazar la partícula entre dichos puntos.

# Campo eléctrico

## Ejercicio

La figura adjunta representa las superficies equipotenciales en una región del espacio en la que existe un campo eléctrico uniforme. Determina el vector campo eléctrico y dibuja las líneas de campo eléctrico. ¿Qué trabajo se realiza al trasladar un electrón desde el punto A hasta el punto B de la figura?





# Campo eléctrico

## Ejercicio

En una región del espacio actúa un campo eléctrico uniforme, de forma que al trasladar una carga de  $0,4\text{ C}$  desde el punto  $A(x, 0)$  hasta el punto  $B(x+0.2, 0)$ , la fuerza eléctrica realiza un trabajo de  $-200\text{ J}$ . Si al punto A se le asigna un potencial eléctrico de  $20\text{ V}$ , calcula el potencial del punto B y la componente del campo eléctrico en la dirección del eje X.

# Campo eléctrico

## Flujo de un campo eléctrico

El flujo del campo eléctrico es una medida del número de *líneas de fuerza* que atraviesan una *superficie* dada.

- **Número de líneas de fuerza:** proporcional a la intensidad del campo,  $\vec{E}$ .
- **Superficie:** Se puede representar mediante un vector  $\vec{S}$  perpendicular a ella y de módulo su área.

Teniendo esto presente, la expresión matemática para el flujo es el producto escalar del vector campo por el vector superficie:

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S}$$

cuya unidad es:  $\text{N m}^2 \text{C}^{-1}$

Para el caso del flujo elemental:  $d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}$

y el total a través de toda la superficie:

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

# Campo eléctrico

## Teorema de Gauss

Cálculo del flujo del campo eléctrico a través de una esfera de radio  $r$  que contiene una carga  $Q$  positiva en su centro.

$$\Phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint E \cdot dS = E \oint dS$$

El campo eléctrico en puntos de la superficie es:  $E = \frac{kQ}{r^2}$

Y la integral extendida a toda la superficie cerrada de los elementos  $dS$  es, precisamente, el valor de la superficie  $S$  de la esfera:  $S = 4\pi r^2$

$$\Phi = E \oint dS = \frac{kQ}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = 4\pi kQ$$

Como  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  obtenemos la expresión de Gauss para el flujo

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

# Campo eléctrico

## Teorema de Gauss. Cálculo de campos eléctricos

El flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es independiente de la forma de la superficie e igual a la carga neta contenida en su interior dividida por  $\epsilon_0$  (permitividad eléctrica).

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

- Elegir la superficie cerrada de área conocida (superficie gaussiana).
- Evaluar el flujo a través de ella.
- Igualar el flujo a la expresión del teorema de Gauss.

# Campo eléctrico

---

## Ejercicios

- ❖ Cálculo del campo creado en el exterior por una esfera uniformemente cargada.
- ❖ Cálculo del campo originado por una placa uniformemente cargada.

# Campo eléctrico

---

## Conductores y aislantes

**Conductor:** cuerpo que posee cargas libres que pueden moverse por él.

**Aislante**, o aislador, o dieléctrico: cuerpo o sustancia que no posee cargas libres.

- ❖ **polar:** las cargas positivas y negativas se distribuyen respectivamente en los extremos de la molécula (dipolo)
- ❖ **no polar:** el centro de las cargas positivas coincide con el de las negativas.

# Campo eléctrico

---

## Conductores en equilibrio electrostático

Un conductor está en equilibrio electrostático cuando sus cargas están en reposo.

- ❖ El campo eléctrico en su interior es nulo.
- ❖ Es equipotencial.
- ❖ El campo en puntos próximos a la superficie exterior es perpendicular a ella.
- ❖ Todo exceso de carga está distribuida en la superficie.

# Campo eléctrico

## Ejercicio

Un electrón que lleva una velocidad de  $\vec{v} = 5 \cdot 10^6 \vec{i}$  m/s accede perpendicularmente a un campo eléctrico uniforme de intensidad  $\vec{E} = 3000 \vec{j}$  N/C. Deduce la ecuación de la trayectoria que describe el electrón. ¿Qué distancia recorre verticalmente el electrón después de trasladarse horizontalmente 12 cm?



# Campo eléctrico

## Ejercicio

Un electrón que tiene una energía cinética de 100 eV recorre sin desviarse de su trayectoria una distancia de 10 cm en la que existe un campo eléctrico uniforme. Si la velocidad del electrón a la salida del campo eléctrico es igual a la mitad de la velocidad con la que accede al campo, calcula: la velocidad inicial del electrón, la variación que experimenta su energía cinética expresada en eV y la expresión vectorial del campo eléctrico atravesado.

# Campo eléctrico

## Ejercicio

Una esfera que tiene una masa de 0,1 g y una carga eléctrica de  $0,1 \mu\text{C}$  se encuentra sujeta al extremo de un hilo de 10 cm de longitud. El otro extremo del hilo está sujeto a un punto de una placa metálica, colocada verticalmente y cargada eléctricamente, que genera un campo eléctrico uniforme de  $5000 \text{ N/C}$ . ¿Qué ángulo forma el hilo con la vertical?

# Campo eléctrico

---

## Ejercicio

Un protón es abandonado en reposo en una región donde existe un campo eléctrico uniforme de  $400 \text{ V/m}$ . ¿Cuál será su velocidad después de recorrer  $30 \text{ cm}$ ?

# Campo eléctrico

## Ejercicio

Un electrón se proyecta en el interior de un campo eléctrico uniforme  $\vec{E} = -2000\vec{j}$  N/C con una velocidad  $\vec{v}_0 = 10^6\vec{i}$  m/s :

- a) Compara la fuerza gravitatoria que existe sobre el electrón con la fuerza eléctrica ejercida sobre él.
- b) Determina la desviación que sufre el electrón después de haber recorrido 5 cm en la dirección X, indicando la dirección y sentido de dicha desviación.