

# Tema 02: Campo eléctrico.



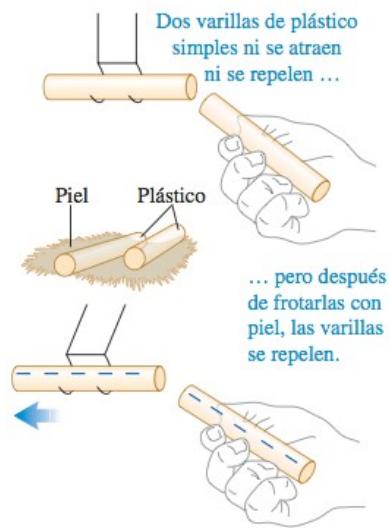
## 0201. Electricidad. Ley de Coulomb.

Las fuerzas eléctricas son las responsables de la gran mayoría de los fenómenos que conocemos: la elasticidad de una goma, la luz eléctrica, las reacciones químicas, incluyendo nuestro metabolismo, etc.

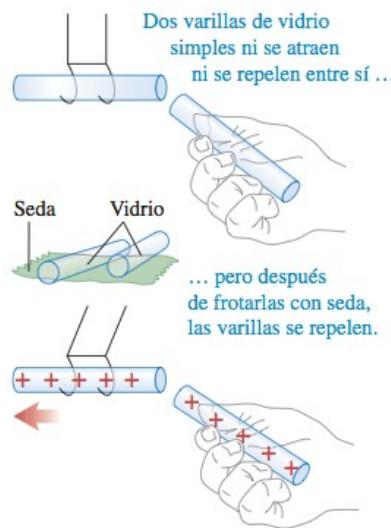
La propiedad responsable de la existencia de estas fuerzas eléctricas es la carga eléctrica que tiene su origen en la estructura atómica de la materia. Toda la materia está formada por átomos que a su vez se componen de protones y neutrones en el núcleo y electrones en la corteza. Los protones tienen carga eléctrica positiva y los electrones tienen carga negativa del mismo valor. En condiciones normales, los átomos, y los cuerpos que forman, son neutros porque tienen igual número de protones que de electrones.

Sin embargo, los electrones de las capas más externas de los átomos pueden desprendérse fácilmente pasando a los átomos de otro cuerpo. En tal caso el primer cuerpo queda cargado positivamente y el segundo cuerpo negativamente. El proceso se llama electrización y una forma muy sencilla de producirlo es por frotamiento.

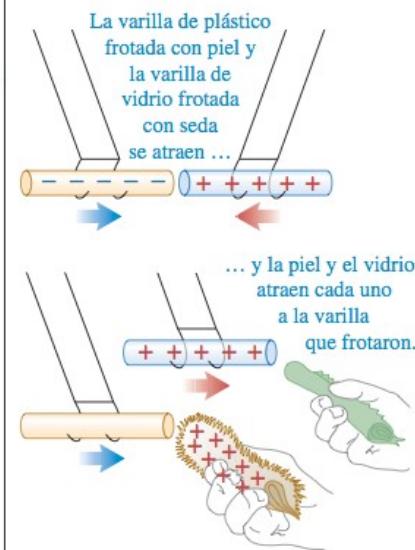
a) Interacción entre varillas de plástico cuando se frotan con piel



b) Interacción entre varillas de vidrio cuando se frotan con seda



c) Interacción entre objetos con cargas opuestas



### PROPIEDADES DE LA CARGA ELÉCTRICA:

**Conservación de la carga eléctrica:** la carga eléctrica se conserva en todos los procesos físicos observados, incluidos aquellos que implican creación o desintegración de partículas.

**Cuantización de la carga eléctrica:** En 1909 Robert Millikan confirmó que la carga eléctrica siempre se presenta en valores múltiplos de cierta carga e que coincide con la carga del electrón o del protón.

Estudiando las fuerzas que actúan entre estos cuerpos cargados se observó que las cargas del mismo signo se repelen y las de distinto signo se atraen. Midiendo estas fuerzas de atracción y repulsión es posible conocer el valor de la carga eléctrica de los cuerpos que las producen. Por tanto la carga eléctrica es una magnitud física.

La interacción entre dos cargas eléctricas viene regida por la **Ley de Coulomb**:

$$\vec{F} = K_e \frac{Q \cdot q}{r^2} \vec{u}_r$$

"La fuerza electrostática entre dos cuerpos cargados es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Su dirección es la de la recta que pasa por ellos, siendo la interacción repulsiva si las cargas son del mismo signo, y atractiva, si son de signo opuesto."

$K_e$  es una constante que depende del medio. Su valor es  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  cuando el medio en el que se encuentran las cargas es el vacío o el aire seco.

En la práctica se utiliza otra constante: la permitividad eléctrica o constante dieléctrica ( $\epsilon$ ), que

para el vacío se representa por  $\epsilon_0$  y que se relaciona con  $K_e$  mediante la expresión:

$$K_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

La constante dieléctrica de medios diferentes al vacío suele expresarse como el producto de una constante dieléctrica relativa adimensional por la constante dieléctrica del vacío:  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

## 0202. Campo eléctrico. Intensidad del campo eléctrico. Líneas de campo.

La ley de Coulomb es muy similar la ley de Newton de la gravitación y presenta el mismo inconveniente: explicar la acción a distancia. Para solventar este problema, la interacción entre dos cargas eléctricas también puede interpretarse como si la carga  $Q$  produjese en el espacio una modificación, que llamamos campo eléctrico. El campo eléctrico hace que al situar una carga en un punto actúe sobre ella una fuerza.

La **intensidad del campo eléctrico** ( $E$ ) en un punto del espacio es la fuerza que se ejerce sobre la unidad de carga positiva colocada en dicho punto.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad E = K_e \frac{Q}{r^2} \hat{u}_r$$

Su unidad en el Sistema Internacional es el N/C.

Por tanto la fuerza ejercida sobre una carga en un punto viene dada por  $\vec{F} = q \vec{E}$

### Principio de superposición:

Si en cierta región del espacio hay varios cuerpos cargados, cada uno interacciona con todos los demás, de tal forma que la fuerza global que actúa sobre una carga (o el campo eléctrico en un punto) es igual a la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por cada una de las cargas sobre ella (o de los campos producidos por cada una de las cargas en ese punto).

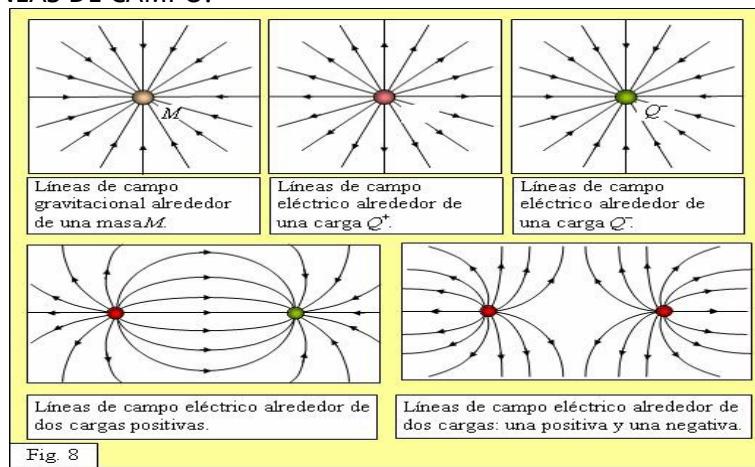
$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = \sum F_i$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots = \sum \vec{E}_i$$

El campo eléctrico puede representarse por **líneas de fuerza** o **líneas de campo**. Deben dibujarse de forma que el vector campo ( $E$ ) sea tangente a ellas en cada punto. Además deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

1. Las líneas de fuerza salen de las cargas positivas y entran en las negativas.
2. El número de líneas que entran o salen de una carga puntual es proporcional al valor de la carga.
3. En cada punto del campo la densidad de líneas de fuerza (número de líneas por unidad de superficie perpendicular a ellas) es proporcional a la intensidad del campo.
4. Dos líneas de fuerza nunca pueden cortarse.

### EJEMPLOS DE LÍNEAS DE CAMPO:



## 0203. Energía potencial eléctrica.

### ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

El campo eléctrico es conservativo puesto que si realizamos un trabajo contra el campo (por ejemplo acercando una carga positiva a otra positiva) éste es devuelto íntegramente por el campo. Por tanto puede definirse una **energía potencial eléctrica**, de forma que el trabajo realizado por la fuerza eléctrica para trasladar la carga entre dos puntos es igual a la variación de la energía potencial entre esos dos puntos cambiada de signo. Mediante una demostración idéntica a la utilizada en el caso gravitatorio se llega a la expresión:

$$E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q \cdot q}{r} \quad E_p = 0 \quad r = \infty$$

Si la energía potencial es positiva el sistema evoluciona espontáneamente hacia una separación de las cargas y una disminución de la energía potencial. Si la energía potencial es negativa el sistema es ligado.

Si acercamos dos cargas positivas realizamos un trabajo contra la fuerza eléctrica. Dicho trabajo queda almacenado en forma de energía potencial eléctrica y podemos recuperarlo dejando en libertad las cargas.

El trabajo realizado por el campo eléctrico se considera positivo, es realizado por una fuerza conservativa, la energía potencial disminuye y es espontáneo; el trabajo que realizamos para vencer las fuerzas del campo es negativo, producido por una fuerza no conservativa, la energía potencial aumenta y no es espontáneo.

## 0204. Potencial eléctrico. Diferencia de potencial. Superficies equipotenciales.

Análogamente al caso gravitatorio se define el **potencial eléctrico** como la energía potencial por unidad positiva de carga colocada en un punto:

$$V = E_p/q$$

La unidad de potencial eléctrico es el **voltio** (V).

El potencial creado por una carga a su alrededor viene dado por:

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

También puede definirse el potencial eléctrico en un punto como el trabajo necesario para trasladar la unidad de carga positiva desde el infinito hasta dicho punto.

El concepto más empleado es la diferencia de potencial entre dos puntos, que puede definirse como el trabajo necesario para trasladar la unidad de carga positiva entre esos dos puntos.

Tanto la intensidad del campo eléctrico como el potencial eléctrico son dos formas distintas y complementarias de describir la interacción eléctrica. Por tanto debe existir una **relación campo-potencial**.

Supongamos que en cierta región del espacio existe un campo eléctrico y que trasladamos una carga entre dos puntos cualquiera de ese campo. El trabajo realizado por la fuerza eléctrica sobre la carga vendrá dado por:

$$W = F \cdot \Delta r = q E \Delta r = q E \Delta r \cos \alpha$$

Además este trabajo debe ser:  $W = -\Delta E_p = -q \Delta V$

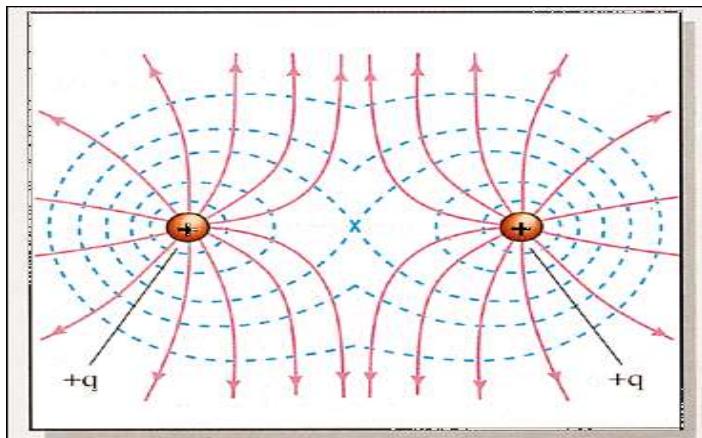
Comparando ambas expresiones obtenemos:  $E \cos \alpha = -\Delta V / \Delta r$

Esta expresión puede generalizarse a cualquier desplazamiento:  $\vec{E}_r = -\frac{dV}{d\vec{r}}$

La componente del campo eléctrico en la dirección de  $\vec{r}$  es igual a la derivada del potencial respecto a  $\vec{r}$  cambiada de signo. Esto implica que:

- Si no varía el potencial en una dirección, la componente del campo en esa dirección es nula.
- Las líneas de fuerza y las superficies equipotenciales son siempre perpendiculares.
- El sentido del campo eléctrico (movimiento de cargas positivas) es siempre hacia potenciales decrecientes.

Si se unen mediante líneas o superficies los puntos del espacio que tienen igual potencial se obtienen las líneas o **superficies equipotenciales**. Siempre son perpendiculares a las líneas de campo.



## 0205. Teorema de Gauss. Conductores y dieléctricos.

### TEOREMA DE GAUSS

Aunque la superficie es una magnitud escalar (no tiene dirección ni sentido), a veces, es útil asignarle un carácter vectorial. Para ello se define el vector superficie como un vector cuyo módulo coincide con el valor de la superficie que estemos considerando, su dirección sea perpendicular a la superficie y su sentido sea hacia afuera de la superficie.

**El flujo del campo eléctrico o flujo eléctrico** es una magnitud que está relacionada con el número de líneas de fuerza que atraviesan determinada superficie. Para campos uniformes y superficies planas se define como:

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

$$\Phi = E_x \cdot S_x + E_y \cdot S_y + E_z \cdot S_z$$

Si el campo no es uniforme y/o la superficie no es plana deben utilizarse integrales para su cálculo.

Calculando el flujo que atraviesa una superficie esférica que rodea a una carga se llega a un resultado mucho más general conocido como **Teorema de Gauss**. Por razones de comodidad la constante eléctrica  $K_e$  se escribe normalmente como  $1/(4\pi\epsilon)$ , siendo  $\epsilon$  otra constante llamada **constante dieléctrica del medio** o permitividad del medio. Su valor en el vacío o en el aire es de:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

Si tenemos una superficie esférica que encierra una carga, el flujo a través de ella será:

$$E = K_e \frac{Q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}$$

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 \Rightarrow \Phi = \frac{Q}{\epsilon}$$

El resultado obtenido es general para cualquier superficie cerrada y para cualquier número o distribución de carga que se encuentre en su interior. Por tanto podemos enunciar el **Teorema de Gauss**: "El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual a la carga neta que existe en el interior de la superficie, dividido por la constante dieléctrica del medio."

El Teorema de Gauss se emplea para calcular el campo eléctrico creado por cuerpos cargados con cierta simetría. A partir de ello se deduce que el campo creado por una esfera con la carga distribuida uniformemente es el mismo que el de una carga puntual del mismo valor colocada en el centro de la esfera.

### CONDUCTORES Y DIELÉCTRICOS

Se llaman conductores a los cuerpos o sustancias que son capaces de transportar la corriente eléctrica; principalmente los metales y los compuestos iónicos fundidos o disueltos. Las sustancias que no conducen la corriente eléctrica se llaman aislantes o dieléctricos.

### CONDUCTORES

En un conductor las cargas tienen libertad de movimientos. Por ello:

- El campo en el interior de un conductor es nulo.
- Cualquier exceso de carga en un conductor aislado debe estar situada en su superficie.
- El campo eléctrico fuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del mismo.

- Como en el interior del conductor el campo es nulo, el potencial eléctrico es constante en todo el conductor. Se le llama potencial del conductor.
- Existe una relación constante entre la carga de un conductor y el potencial que adquiere. Se llama capacidad:

$$C = Q / V$$

La capacidad de un conductor depende sólo de sus características geométricas y se mide en faradios (F).  $1 F = 1 C / 1 V$ .

## DIELÉTRICOS

Se caracterizan por la baja movilidad de sus electrones.

Algunos de ellos están formados por moléculas polares; al introducirlos en un campo eléctrico los dipolos se orientan.

En otros casos están formados por moléculas no polares; al introducirlos en un campo eléctrico se produce un pequeño desplazamiento de las cargas, aparecen dipolos inducidos que se orientan.

En ambos casos el resultado es la aparición de cargas superficiales que crean un campo  $E'$  de sentido opuesto al campo exterior  $E_0$ .

$$E = E_0 - E'$$

Esto hace que el campo eléctrico en el interior de un dieléctrico se reduzca. El factor en el que se reduce es igual a la constante dieléctrica relativa del dieléctrico.

$$E = E_0 / \rho_r$$

## 0206. Movimiento de cargas en campos uniformes.

Si una partícula de masa  $m$  con una carga positiva  $q$  se encuentra en un campo eléctrico de intensidad  $E$ , actúa sobre ella una fuerza eléctrica  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ ; en consecuencia, experimentará una aceleración  $\vec{a}$  que viene dada por:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m} \cdot \vec{E}$$

- Si la partícula tiene inicialmente una velocidad en la dirección del campo eléctrico, la aceleración y la velocidad tienen la misma dirección, es decir, la partícula se mueve con movimiento rectilíneo uniformemente acelerado en la dirección del campo. Podemos conocer la velocidad que adquiere la carga al someterla a una diferencia de potencial utilizando el Principio de Conservación de la Energía:

$$\Delta E_p = E_c \Rightarrow q \cdot \Delta V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot \Delta V}{m}}$$

- Si la partícula entra en el campo con una velocidad perpendicular al campo eléctrico, la aceleración es perpendicular a la velocidad. El movimiento de la partícula viene dado por la composición de dos movimientos: uno rectilíneo uniforme perpendicular al campo y otro rectilíneo uniformemente acelerado en la dirección del campo. El resultado es que la trayectoria es una parábola.

Una aplicación importante de lo anterior es el movimiento de electrones en los tubos de rayos catódicos, que se controla mediante campos eléctricos. Con ello el electrón se hace incidir en el punto de la pantalla que se deseé. Este tubo de rayos catódicos es el elemento principal y más voluminoso de la televisión.