TEMA 2: INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA

2.1 INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA: LEY DE COULOMB

2.1.1 Introducción histórica:

Las experiencias elementales sobre electrostática son conocidas desde la antigüedad, si bien sólo se conocía el fenómeno, no su explicación ni posibles aplicaciones.

Así, hacia el año 600 a.C., el filósofo griego **Tales de Mileto** describe cómo el ámbar (*elektron*, en griego), al ser frotado, atrae pequeños trozos de hilo, pelusa, hierba seca...

S. XVI:	Gilbert (Inglaterra)	Distingue entre fenómenos eléctricos y magnéticos Propone un primer modelo para explicar la electricidad. Propone que la Tierra es un imán, con lo que explica la brújula.	
S.XVIII:	Du Fay (Francia)	Distingue dos tipos de electricidad	Vítrea (vidrio) Resinosa (ámbar)
	Leyden (Alemania)	Primer condensador	
	Franklin (EEUU)	Descubre que los rayos son fenómenos eléctricos. Inventa el pararrayos. Propone los signos + y **-** para los dos tipos de electricidad. Propone la teoría del "*fluido eléctrico*".	
	Volta (Italia)	Construye la primera pila.	
	Coulomb (Francia)	Establece el concepto de carga eléctrica. Ley de Coulomb: explica la interacción electrostática.	

2.1.2 Carga eléctrica (Q): propiedades:

- La carga eléctrica es una propiedad asociada a la materia, que permite explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos

- Es una magnitud escalar — Unidades SI: Culombio (C)
  - submúltiplos: mC (miliculombio) = 10^{-3} C
  - μC (microculombio) = 10^{-6} C
  - nC (nanoculombio) = 10^{-9} C
  - Otras unidades: unidad electrostática elemental (uee) = $3{,}33 \cdot 10^{-10}$ C
  - Faraday (mol de electrones) = 96500 C
  - Carga del electrón (en valor absoluto) = e = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

- Dos tipos: positiva (+) y negativa (**-**). Los cuerpos neutros tienen igual nº de cargas + y **-**

- Discontinua: Está asociada a partículas subatómicas : protones (+) y electrones (**-**). Un cuerpo cargado sólo puede tener una carga que sea un múltiplo de la carga del electrón (o del protón, es la misma pero con signo contrario, e = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C)

- Aditiva: la carga total es la suma de las cargas.

2.1.3 Interacción electrostática : propiedades

- Interacción entre cargas en reposo
- La interacción entre cargas es atractiva o repulsiva según el signo
  = signo : repulsiva
  ≠ signo :atractiva
- Afecta a cuerpos con caga eléctrica neta. Es proporcional al valor de las cargas.
- Tiene alcance infinito.
- La intensidad de la interacción disminuye con la distancia como $1/r^2$
- Es una interacción conservativa.
- Es una interacción de tipo central.
- La intensidad de la interacción depende del medio que rodee a las cargas

Ley de Coulomb: Explica la interacción electrostática y da una expresión operativa de la misma.

"*Entre dos cuerpos con cargas eléctricas Q y q, se ejercen fuerzas de atracción o repulsión, que son proporcionales al producto de las cargas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que los separa*."

Así, tenemos la expresión $F_e = K \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}$ en forma vectorial $\vec{F_e} = K \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \vec{u_r}$

Esta expresión de la ley de Coulomb sólo es válida si los cuerpos cargados eléctricamente pueden considerarse puntuales

La constante de proporcionalidad K ⟶ Constante eléctrica.
Indica la dependencia de la fuerza electrostática con el medio

$$K = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon}$$

Donde ε es una constante que sólo depende del medio. Se denomina permitividad eléctrica del medio

En el vacío $K_0 = 9 \cdot 10^9$ Nm^2/C^2 $\varepsilon_0 = 8{,}8 \cdot 10^{-12}$ C^2/Nm^2

La permitividad eléctrica se mide en relación al vacío (que es la menor que existe). El cociente entre la permitividad del medio que estamos estudiando (ε) y la del vacío (ε_0), se denomina **permitividad relativa (ε_r)**, y es el dato que aparece en las tablas y los problemas.

Algunos valores de ε_r	
Vacío:	1
Aire:	1,0006
Polietileno:	2,3
Nylon.	3,7
Madera:	2,5 - 8
Vidrio:	5 - 10
Sal común:	6,1
Alcohol:	28,4
Agua(20ºC):	81

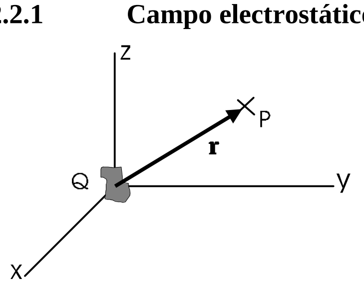
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Por lo que $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$; $\varepsilon_r \geq 1$

$$K = \frac{K_0}{\varepsilon_r}$$

2.2 CAMPO Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO; ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

2.2.1 Campo electrostático



Supongamos que, en una cierta región del espacio, tenemos un cuerpo cargado eléctricamente (Q). Debido a esa característica, dicho cuerpo interaccionará electrostáticamente con cualquier otra carga q que coloquemos en cualquier punto del espacio. Es decir, la carga Q modifica las propiedades del espacio, crea una nueva magnitud en él, a la que llamaremos *campo electrostático*.

Cualquier carga *q* (carga de prueba) colocada en cualquier punto del espacio sufrirá una fuerza electrostática $\vec{Fe}$. Esta fuerza dependerá de
- Las cargas Q y *q*
- El punto del espacio en el que coloquemos *q*

Si calculamos la fuerza que se ejercería por cada unidad de carga (por cada culombio) que colocáramos en el punto del espacio que estudiamos; entonces obtendremos una magnitud que no depende de la carga q que coloquemos en el punto, sino que únicamente depende del punto y de la carga que ha creado el campo (Q).

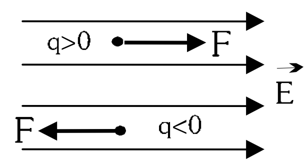
Esta magnitud así obtenida se denomina **Intensidad de Campo Eléctrostático** o **Campo Electrostático** ($\vec{E}$)

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F_e}}{q}} \qquad \boxed{\vec{F_e} = q \cdot \vec{E}}$$

Unidades de $\vec{E}$: [E] = N/C

Efectos del campo eléctrico: de la expresión $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, podemos extraer varias consecuencias sobre los efectos que produce la fuerza electrostática:

- La fuerza electrostática sólo actúa sobre partículas cargadas (estén en reposo o en movimiento)
- La dirección de la fuerza (y de la aceleración que originará , si es la única fuerza aplicada) es paralela al campo
- El sentido de la fuerza depende del signo de la carga q sobre la que actúe el campo



2.2.2 Energía potencial electostática (Ep_e) de una carga q en el interior de un campo eléctrico:

- Es la energía que almacena una carga q colocada en un punto del interior del campo electrostático.

- También puede definirse teniendo en cuenta que la fuerza electrostática es conservativa. La Ep_e será la función potencial asociada a la fuerza electrostática. Es decir

$$W_{Fe} = -\Delta Ep_e \qquad \Delta Ep_e = -\int_A^B \vec{F_e} \cdot \vec{dr}$$

Esta energía potencial, como es evidente, se mide en julios, y depende de la carga q colocada.
Puede ser positiva o negativa, según el signo de q y las características del campo.

2.2.3 Potencial electrostático (V) en un punto del espacio:

- Energía por unidad de carga positiva (por cada C) que almacenaría cualquier cuerpo con carga eléctrica que colocáramos en dicho punto del espacio.

$$\boxed{V = \frac{Ep_e}{q}} \qquad \boxed{Ep_e = q \cdot V}$$

[V] = J/C = Voltio (V)

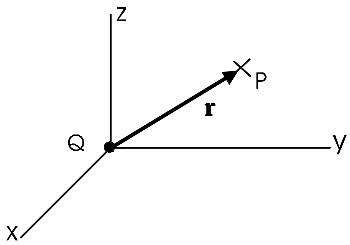
El potencial V es una propiedad del espacio. Es independiente de la carga q que coloquemos en el punto.

- También (con un razonamiento similar al de la energía potencial) podemos definir el potencial electrostático como *la función potencial asociada al campo electrostático.* $\Delta V = -\int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dr}$

Lo estudiado hasta ahora es general, es válido para cualquier campo electrostático que tengamos. A partir de ahora veremos casos particulares. Los resultados que obtendremos sólo se podrán aplicar en un problema si estamos en ese caso particular.

2.3 CAMPOS CREADOS POR CARGAS PUNTUALES

2.3.1 Campo creado por una carga puntual:



Supongamos una carga puntual Q. Crea un campo electrostático a su alrededor. Cualquier carga de prueba q que coloquemos en un punto del espacio, sufrirá una fuerza electrostática.

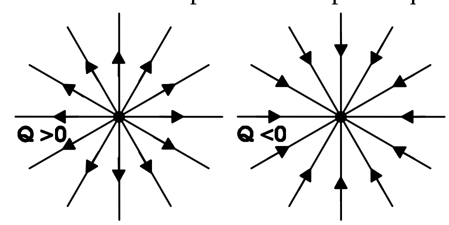
Dado que tanto Q como q son cargas puntuales, la <u>Fuerza</u> vendrá dada por la ley de Coulomb:

$$\overrightarrow{F_e} = K \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$$ El módulo debe ser > 0 $$F_e = K \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}$$

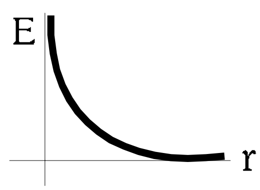
<u>Campo eléctrico</u> $\vec{E}$: Fuerza ejercida por unidad de carga sobre una partícula colocada en el punto del espacio que estamos estudiando.

$$\vec{E} = \frac{\overrightarrow{F_e}}{q} = \frac{K \cdot Q \cdot \cancel{q}}{r^2 \cdot \cancel{q}} \cdot \overrightarrow{u_r} = \frac{K \cdot Q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$$

Líneas de campo



Módulo $$E = \frac{K \cdot |Q|}{r^2}$$ ($E > 0$)



<u>Energía potencial electrostática</u> <u>(Ep_e):</u> Energía almacenada por una carga q colocada en el interior del campo electrostático creado por Q. (esa energía es almacenada por el sistema formado por ambas cargas)

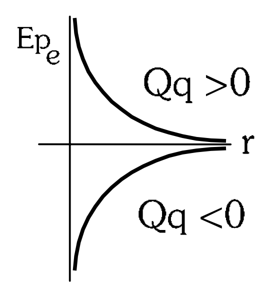
Partimos de la expresión general $\Delta Ep_e = -W_{Fe}$ Así tendremos:

$$\Delta Ep_e = -\int_A^B \overrightarrow{F_e} \cdot \overrightarrow{dr} = -\int_{r_A}^{r_B} \frac{K \cdot Q \cdot q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r} \cdot dr \cdot \overrightarrow{u_r} = -K \cdot Q \cdot q \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{r^2} \cdot dr = -K \cdot Q \cdot q \cdot \left[-\tfrac{1}{r}\right]_{r_A}^{r_B} =$$

$$= \frac{K \cdot Q \cdot q}{r_B} - \frac{K \cdot Q \cdot q}{r_A}$$

Elegimos origen . Para $r_A \rightarrow \infty$, $Ep_A = 0$.

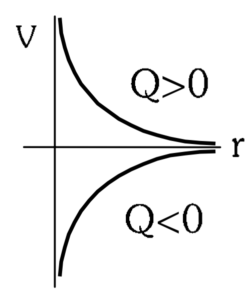
Y la expresión queda $$\boxed{Ep_e = \frac{K \cdot Q \cdot q}{r}}$$



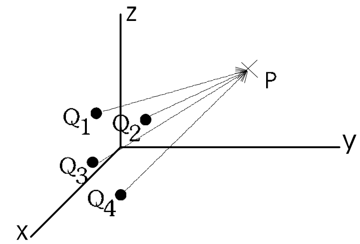
La Ep_e almacenada puede ser positiva o negativa, según el signo de Q y q

<u>Potencial electrostático en un punto</u> <u>(V):</u> Energía por unidad de carga positiva (por cada C) que almacenaría cualquier cuerpo con carga eléctrica que colocáramos en dicho punto del espacio

$$V = \frac{Ep_e}{q} = \frac{K \cdot Q \cdot \cancel{q}}{r \cdot \cancel{q}}$$ $$\boxed{V = \frac{K \cdot Q}{r}}$$



2.3.2 Campo electrostático creado por varias cargas puntuales:



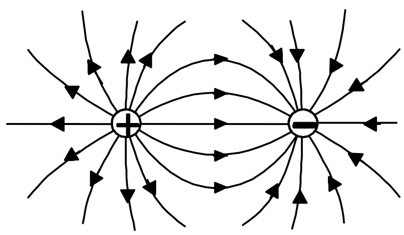
En este caso aplicamos el *principio de superposición* (el efecto producido por un conjunto de cargas puede calcularse sumando los efectos de cada carga por separado). Así

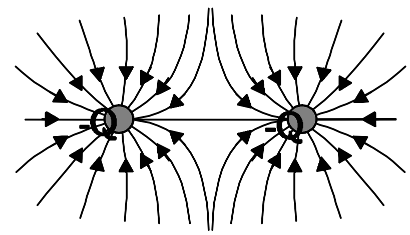
$$\vec{F}_e = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots$$

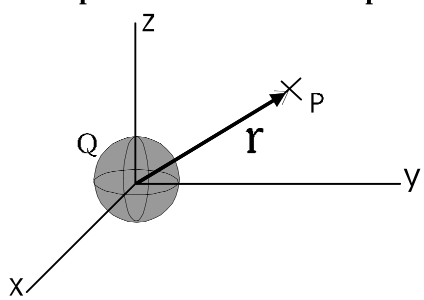
$$Ep_e = Ep_1 + Ep_2 + Ep_3 + \ldots$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots$$





2.3.3 Campo electrostático creado por una esfera cargada en su exterior:

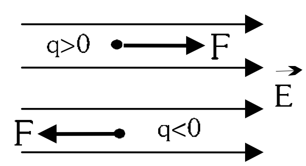


Son válidos los resultados obtenidos para cargas puntuales.
(la demostración, en el apartado 2.3)

Q es la carga neta de la esfera y r la distancia al centro de la misma

2.3.4 Campo electrostático constante: $\vec{E} = cte$

En este caso sólo podemos usar los resultados generales vistos al principio.

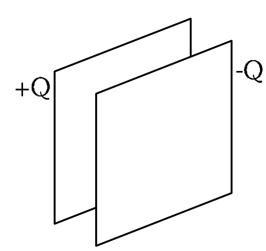


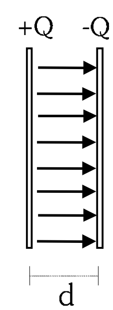
$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ (con lo que $\vec{F} = cte$) $Ep_e = q \cdot V$

$$W_{Fe} = \int_A^B \overrightarrow{F_e} \cdot \overrightarrow{dr} = \overrightarrow{F_e} \cdot \overrightarrow{\Delta r} \qquad \Delta V = -\int_A^B \vec{E} \cdot \overrightarrow{dr} = -\vec{E} \cdot \overrightarrow{\Delta r}$$

Un ejemplo muy usado de campo eléctrico constante es el *condensador*. Consiste en dos placas metálicas planas y paralelas, cargadas con cargas idénticas, pero de signo contrario. Entre las placas se genera un campo eléctrico constante.

$\vec{E} = cte$ Dirección: perpendicular a las placas
Sentido: de la placa + a la -





Diferencia de potencial entre las placas: $\Delta V = V_- - V_+ = -E \cdot \Delta r = -E \cdot d$

Normalmente se da la diferencia en valor absoluto (el potencial de la placa positiva menos el de la negativa).

$$\Delta V = V_+ - V_- = E \cdot d$$

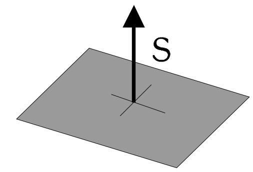
2.4 TEOREMA DE GAUSS. APLICACIÓN AL CÁLCULO DE CAMPOS ELECTROSTÁTICOS

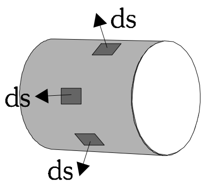
2.4.1 Vector superficie: La forma que tenemos en Física y en geometría de representar las superficies mediante una magnitud es usar el vector superficie ($\vec{s}$). Este vector tiene como características:

Su dirección es perpendicular a la superficie

Su módulo es igual al área.

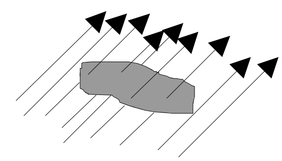
El sentido puede elegirse. Cuando una superficie es cerrada, normalmente va hacia fuera de la misma.





Cuando una superficie no es plana, vemos que no existe un único vector superficie, ya que este va cambiando de dirección. Se procede entonces a dividir la superficie en trozos infinitamente pequeños, a cada uno de los cuales corresponde un vector superficie $d\vec{s}$.

2.4.2 Flujo del campo electrostático (Φ_E):



El concepto de flujo nos da una idea de la concentración de líneas de campo en una zona del espacio. Es otra forma de medir lo intenso que es el campo en ese sitio.

Supongamos una superficie cualquiera dentro del campo electrostático. Habrá líneas de campo que la atravesarán, otras no. El flujo nos va a indicar si dicha superficie es atravesada con más o menos intensidad por las líneas de campo.

Esta magnitud dependerá de: La intensidad del campo en la zona (el valor de $\vec{E}$).
El tamaño y forma de la superficie
La orientación entre la superficie y el campo.

Estas tres características quedan recogidas en la expresión que calcula el flujo que atraviesa una determinada superficie. $\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$ unidades de flujo electrostático $[\Phi_E] = [E] \cdot [S] = N \cdot C^{-1} \cdot m^2$

En el caso de que el campo gravitatorio sea uniforme (que tenga el mismo valor en todos los puntos de la superficie), $\vec{E}$ puede salir fuera de la integral, con lo que el flujo quedará $\Phi_E = \vec{E} \cdot \int_S d\vec{s} = \vec{E} \cdot \vec{S} = E \cdot S \cdot cos\,\alpha$

Ejemplo. Cálculo del flujo que atraviesa una superficie esférica (la carga Q que crea el campo se encuentra en el centro de dicha superficie).

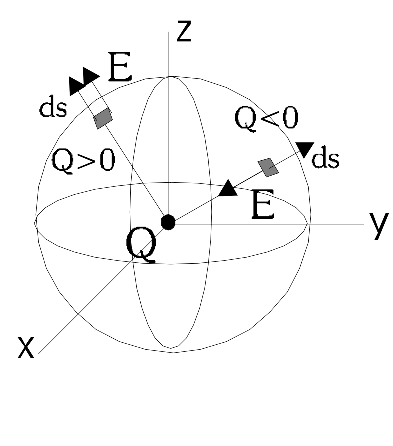
Sabemos la expresión del campo electrostático creado por una carga puntual. $\vec{E} = \frac{K \cdot Q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$

$\vec{E}$ tiene dirección radial. Su sentido depende del signo de Q. En la figura vemos que forma 0º ó 180º con el vector superficie $d\vec{s}$. Así, el flujo se calculará:

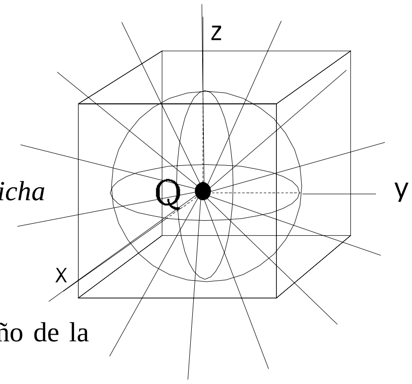
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_S E \cdot ds \cdot cos(0º\ ó\ 180º) = \pm \int_S E \cdot ds$$

Como E se mantiene constante en toda la superficie, podemos sacarlo fuera de la integral

$$\Phi_E = \pm \int_S E \cdot ds = \pm E \cdot \int_S ds = \pm E \cdot S = \pm \frac{K \cdot |Q|}{r^2} \cdot 4\pi \cdot r^2 = 4\pi \cdot K \cdot Q = \frac{Q}{\varepsilon}$$



2.4.3 Teorema de Gauss:



El teorema de Gauss aplicado al campo electrostático nos dice los siguiente:

El flujo total que atraviesa una superficie <u>*cerrada*</u> *en el interior de un campo electrostático es proporcional a la carga eléctrica neta encerrada por dicha superficie.* $\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = 4\pi \cdot K \cdot Q = 4\pi \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot Q = \frac{Q}{\varepsilon}$

Según la expresión, vemos que el flujo no depende de la forma ni el tamaño de la superficie, siempre que sea cerrada y encierre la misma cantidad de carga.

Cuestión: ¿Qué ocurre si la superficie cerrada no contiene en su interior ninguna carga?

<u>APLICACIONES:</u>

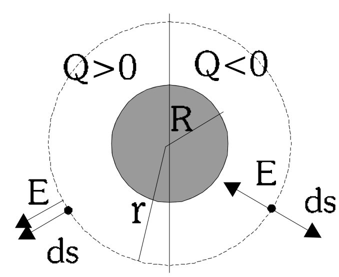
El teorema de Gauss permite calcular la expresión del campo electrostático creado por algunas distribuciones de masa. Deben ser cuerpos que posean cierta simetría (esférica, cilíndrica, plana), en los que podamos tener una idea de la dirección que llevarán las líneas de campo en cada punto.

El objetivo que se persigue al aplicar el teorema de Gauss es el de poder despejar *E* de la fórmula $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\varepsilon}$. Para ello, para que *E* salga fuera de la integral, es preciso que tenga un valor constante en toda la superficie y que además sea perpendicular a la misma. Así:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_S E \cdot ds \cdot cos(0^o \, ó \, 180^o) = \cdot \pm E \cdot \oint_S ds = \pm E \cdot S = \frac{Q}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad E = \left| \frac{Q}{S \cdot E} \right|$$

Donde S es el valor de la superficie (llamada *superficie gaussiana*) utilizada, y Q es la carga total que queda encerrada dentro de la superficie gaussiana. Lo veremos en los casos que se exponen a continuación:

2.4.4 Cálculo de $\vec{E}$ creado por una esfera cargada en su exterior:



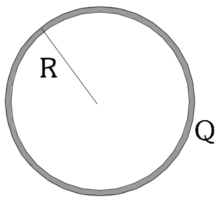
El cuerpo que va a crear el campo tiene simetría esférica. Sabemos que las líneas de campo irán en dirección radial y que el valor del campo dependerá exclusivamente de la distancia al centro de la esfera. La superficie gaussiana que andamos buscando debe ser perpendicular a las líneas de campo y mantener constante el valor de *E* en todos sus puntos: es claramente una esfera de radio *r* cualquiera (siempre mayor que el radio R de la esfera).

Aplicando el teorema de Gauss al campo que atraviesa dicha superficie:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_S E \cdot ds \cdot cos(0^o \, ó \, 180^o) = \cdot \pm E \cdot \oint_S ds = \pm E \cdot S = \frac{Q}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad E = \left| \frac{Q}{S \cdot \varepsilon} \right| = \left| \frac{Q}{4\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon} \right| = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{|Q|}{r^2} = \frac{K \cdot |Q|}{r^2}$$

de este modo $E = \frac{K \cdot |Q|}{r^2}$, que es la expresión que habíamos visto anteriormente.

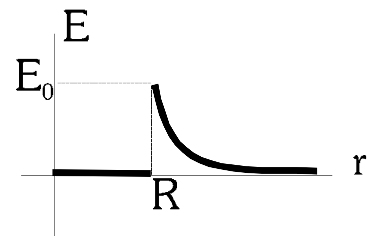
2.4.5 Cálculo de $\vec{E}$ creado por una <u>esfera hueca</u> (la carga está distribuida sólo en la superficie) en su interior:



Esto ocurre en las sustancias metálicas, por ejemplo. Dada la gran movilidad de los electrones en los metales, al cargar eléctricamente una esfera metálica, la repulsión entre las cargas hace que los electrones se alejen lo más posible unos de otros, quedando distribuidos en la superficie.

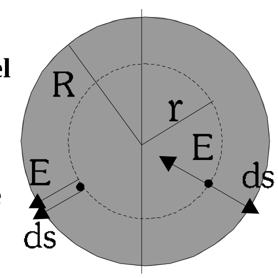
Aplicando el teorema de Gauss al interior, vemos que cualquier superficie cerrada que tomemos, no encerrará ninguna carga, con lo que:

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{s} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon} = 0 \;\Rightarrow\; \oint_S E\cdot ds\cdot cos\alpha = \pm E\cdot \oint_S ds = 0 \Rightarrow E_{int} = 0$$



Se puede probar que esto ocurre en el interior de cualquier cuerpo metálico cargado. Siempre que la carga esté distribuida por la superficie, el campo electrostático en el interior será cero.

2.4.6 Cálculo de $\vec{E}$ creado por una <u>esfera maciza</u> (la carga está distribuida en todo el volumen) en su interior:

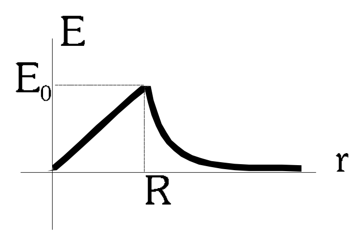


El cuerpo tiene simetría esférica y las líneas de campo van a llevar, por tanto, dirección radial. Como ocurría anteriormente, la superficie gaussiana que usaremos será una esfera de radio *r* (menor que R, en este caso). Aplicamos el teorema de Gauss a esa esfera:

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{s} = \oint_S E\cdot ds\cdot cos\alpha = \pm E\cdot \oint_S ds = \pm E\cdot S = \pm E\cdot 4\pi\cdot r^2 = \frac{Q_{int}}{\varepsilon} \quad\to\quad E = \frac{\pm Q_{int}}{4\pi\varepsilon\cdot r^2} = \frac{K\cdot |Q_{int}|}{r^2}$$

Ahora, la carga encerrada por la esfera gaussiana no es toda la carga del cuerpo, sino sólo una parte. La calculamos:

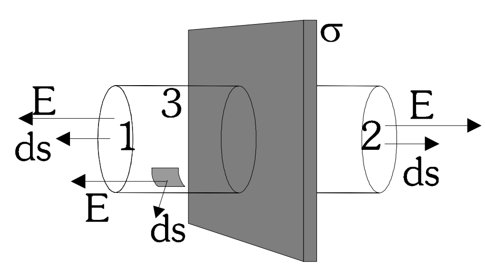
$$Q_{int} = \rho\cdot V_{int} = \frac{Q_{tot}}{V_{tot}}\cdot V_{int} = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi\cdot R^3}\cdot \tfrac{4}{3}\pi\cdot r^3 = \frac{Q\cdot r^3}{R^3}$$



Entonces $$E = \frac{K\cdot |Q_{int}|}{r^2} = \frac{K\cdot |Q|\cdot r^3}{r^2\cdot R^3} \quad\Rightarrow\quad E = \frac{K\cdot |Q|\cdot r}{R^3}$$

Vemos que, en el interior, *E* disminuye conforme profundizamos, hasta hacerse cero en el centro de la esfera.

2.4.7 Campo electrostático creado por una lámina plana cargada:



Consideramos que la carga está repartida uniformemente por la lámina, con una densidad superficial de carga $\sigma = \frac{Q}{S}$. El cálculo que haremos es exacto únicamente si suponemos que la placa tiene una extensión infinita, pero sirve como muy buena aproximación cuando la distancia a la que estamos de la lámina es muy pequeña comparada con el tamaño de la misma.

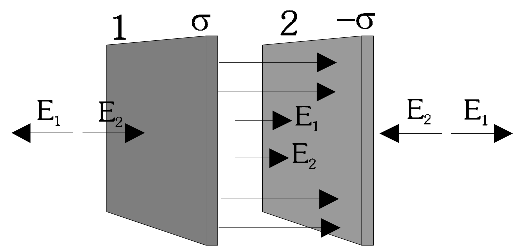
En este caso (suponiendo que la carga es positiva), el campo $\vec{E}$ es perpendicular a la lámina y dependerá (como mucho) de la distancia a la misma. La superficie gaussiana que usaremos es la que aparece en la figura. En las caras 1 y 2, el flujo será $\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_S E \cdot ds \cdot \cos 0^o = E \cdot S$. En la cara lateral, como $\vec{E} \perp d\vec{s}$, el flujo a través de la misma es nulo (las líneas de campo no atraviesan la superficie). Calculando el flujo total, y aplicando el teorema de Gauss:

$$\Phi_{tot} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = E \cdot S + E \cdot S + 0 = 2 \cdot E \cdot S = \frac{Q_{int}}{\varepsilon} \rightarrow 2 \cdot E \cdot S = \frac{\sigma \cdot S}{\varepsilon} \rightarrow E = \frac{\sigma}{2\varepsilon}$$

vemos que el campo eléctrico es constante, no depende de la distancia a la que nos encontremos de la placa. Esto es un resultado bastante aproximado cuando esta distancia es muy pequeña, como ya dijimos al principio.

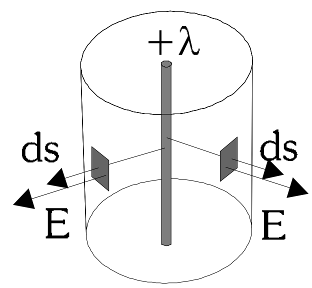
Cuando colocamos dos láminas planas cargadas, con cargas iguales pero de signo contrario, tenemos un aparato eléctrico denominado *condensador*. En esta situación, el campo entre las placas será la suma de los campos (ppio. de superposición), con lo que $E = E_1 + E_1 = 2 \cdot \frac{\sigma}{2\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

En el exterior del condensador, $\vec{E}$ se anula.



2.4.8 Campo electrostático creado por un hilo de carga (o un cilindro mucho más largo que ancho):

Este caso es una buena aproximación de una situación real, como es el caso de un cable cargado. Aquí las líneas del campo electrostático van hacia fuera del hilo en perpendicular a éste. La superficie gaussiana que usaremos será un cilindro centrado en el cable. La carga está distribuida uniformemente en el hilo, con una densidad lineal de carga $\lambda = \frac{Q}{L}$



Aplicando el teorema de Gauss:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_S E \cdot ds \cdot \cos(0^o \text{ ó } 180^o) = \cdot \pm E \cdot \oint_S ds = \pm E \cdot S = \frac{Q}{\varepsilon} \rightarrow E = \frac{|Q|}{S \cdot \varepsilon} = \frac{\lambda \cdot L}{2\pi \cdot r \cdot L \cdot \varepsilon} = \frac{\lambda}{2\pi \cdot r \cdot \varepsilon}$$

Vemos que este campo disminuye con la distancia al hilo, pero no con el cuadrado de la distancia.

.

PROBLEMAS SOBRE CAMPO ELECTROSTÁTICO:

1- Calcular la fuerza de atracción entre un ión cloruro y un ión sodio a una distancia de $2 \cdot 10^{-8}$ cm el uno del otro, si se encuentran

a) En el vacío *($5{,}76 \cdot 10^{-9}$ N)* b) En agua ($\varepsilon_r = 81$) *($7{,}11 \cdot 10^{-11}$ N)*

2.- Dos partículas α (He^{++}), están separadas 10^{-14} m. Calcular la fuerza electrostática con la que se repelen, la fuerza gravitatoria con la que se atraen y comparar ambas entre sí.
(datos $m_\alpha = 6{,}68 \cdot 10^{-27}$ kg ; $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C) *(Fe = 9,216 N ; Fg = $2{,}98 \cdot 10^{-35}$ N)*

3.- Dos esferas muy pequeñas (de radio despreciable) pesan 4 N cada una y están suspendidas de un mismo punto por sendos hilos de 5 cm de longitud. Al cargar cada una de las esferas con la misma carga negativa, los hilos se separan y, en la situación de equilibrio, forman un ángulo de 45º con la vertical. Calcular el valor de la carga.

($Q = -1{,}46 \cdot 10^{-6}$ C)

4.- Un cuerpo cuyo peso es 1 N está cargado con 2 μC. ¿A qué distancia sobre él debe colocarse otro cuerpo cargado con 3 μ C, de signo contrario, para que el primero no caiga por la acción de su peso? *(0,23 m)*

5.- Una carga positiva de 2 μ C está en el origen de un sistema de coordenadas. Calcular:
a) Campo eléctrico en el punto (2,3) m y fuerza electrostática ejercida sobre una partícula cargada con -2 μ C situada en dicho punto. *($\vec{E} = 768\,\vec{i} + 1152\,\vec{j}$ N/C ; $\vec{F}_e = -1{,}54 \cdot 10^{-3}\,\vec{i} - 2{,}3 \cdot 10^{-4}\,\vec{j}$ N)*
b) Potencial eléctrico V en un punto P situado a 4 m del origen (considerando $V_\infty = 0$) *(V = 4500 V)*
c) ¿Cuánto trabajo debe ser realizado por un agente exterior para llevar una carga de 3 μC desde el infinito hasta P?

(Wext = -We = 0,0135 J)

6.- Dos cargas eléctricas puntuales, la una A triple que la otra B, están separadas un metro. Determinar el punto en que la unidad de carga positiva está en equilibrio cuando:

a) A y B tienen el mismo signo *($r_A = 0{,}64$ m , $r_B = 0{,}37$ m)*
b) A y B tienen signos opuestos *($r_A = 2{,}37$ m , $r_B = 1{,}37$ m)*
c) ¿Se anulará el potencial electrostático en dichos puntos? Razonar.

7- Dos cargas $q_1 = 2\ \mu C$ y $q_2 = 4\ \mu C$ están situadas, respectivamente, en los puntos (0,2) y (0,-2) m. Calcular:
a) Campo y potencial electrostáticos en el punto (4,0) m. *($\vec{E}_{(4,0)} = 2415\ \vec{i} + 402{,}5\ \vec{j}$ N/C ; $V_{(4,0)} = 12075$ V)*
b) Trabajo necesario para trasladar una carga de 6 μC desde el infinito hasta el punto (4,0) m. *(Wext = -We = 0,072 J)*

8.- El potencial creado por una carga puntual a cierta distancia de ella es de 600 V y el campo eléctrico en el mismo punto es 200 N/C . ¿Cuál es la distancia a la carga desde el punto? ¿Cuál es el valor de la carga? *(r = 3 m , $Q = 2 \cdot 10^{-7}$ C)*

9. Una carga puntual Q crea un campo electrostático. Al trasladar una carga q desde un punto A al infinito, se realiza un trabajo de 5 J. Si se traslada desde el infinito hasta otro punto C, el trabajo es de -10 J.
a)¿Qué trabajo se realiza al llevar la carga desde el punto C hasta el A? ¿En qué propiedad del campo electrostático se basa la respuesta? *($W_{CA} = 5$ J)*
b) Si q = -2 μC, ¿Cuánto vale el potencial en los puntos A y C?

10. Aceleramos un electrón desde el reposo mediante una diferencia de potencial de 10 kV.
a) Analizar energéticamente el proceso, calculando la velocidad que alcanza el electrón. Realizar un esquema, indicando el movimiento realizado por el electrón, y la disposición de los puntos de mayor y menor potencial. *($v = 5{,}93 \cdot 10^7$ m/s)*
b) Repetir el apartado anterior para un protón, y para un neutrón *(protón: $v = 1{,}39 \cdot 10^6$ m/s ; neutrón: no se acelera)*
(datos: $m_p \approx m_n = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C)

11. Una partícula de carga $6 \cdot 10^{-6}$ C se encuentra en reposo en el punto (0,0). Se aplica un campo eléctrico uniforme de 500 NC^{-1}, dirigido en el sentido positivo del eje OY.
a) Describa la trayectoria seguida por la partícula hasta el instante en que se encuentra en el punto A, situado a 2 m del origen. ¿aumenta o disminuye la energía potencial de la partícula en dicho desplazamiento? , ¿en qué se convierte dicha variación de energía?
b) Calcule el trabajo realizado por el campo en el desplazamiento de la partícula y la diferencia de potencial entre el origen y el punto A. *($We = 6 \cdot 10^3$ J ; $V_O - V_A = 1000$ V)*

12.- Un electrón se lanza con una velocidad de 10^7 ms^{-1} y penetra en la región comprendida entre dos conductores horizontales, planos y paralelos, de 8 cm de longitud y separados entre sí 1 cm, en la que existe un campo eléctrico uniforme. El electrón penetra en la región por un punto equidistante de los dos conductores planos y, a la salida, pasa justamente por el borde del conductor superior.
a) Razonar qué tipo de movimiento describirá el electrón
b) Calcular el campo eléctrico que existe entre los conductores y diferencia de potencial entre ellos *($\mathbf{E} = -8875\ \mathbf{j}$ N/C)*
(datos: $q_e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg)

13. Una esfera uniformemente cargada tiene un potencial de 450 V en su superficie y a una distancia radial de 20 cm de la superficie, el potencial es de 150 V. Calcular el radio de la esfera y su carga. *(R = 0,1 m , $Q = 5 \cdot 10^{-9}$ C)*

14.- Una esfera de 8 cm de radio posee una carga eléctrica de - 0,3 μC. Calcular:
a) Potencial en un punto de la superficie. *(Vsup = -33750 V)*
b) Campo y potencial en un punto situado a 12 cm de la superficie. *(E = 67500 N/C , V = -13500 V)*

15.- Una carga de 4 μC está distribuida uniformemente sobre una superficie esférica de 10 cm de radio. Calcular:
a) Trabajo necesario para alejar radialmente una carga de -3 μC desde un punto situado a 10 cm de la superficie esférica, una distancia de 5 cm. *(Wext = -We = 0,108 J)*
b) En qué puntos sería nulo el campo si colocamos una carga puntual de 6 μC a 20 cm de distancia de la superficie esférica? *(r1 = 0,18 m ; r2 = 0,12 m)*

16. Calcular la energía del electrón de un átomo de hidrógeno en su estado fundamental (según el modelo de Böhr)

($m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, $r = a_0 = 0{,}53$ $\overset{0}{A}$)

CUESTIONES TEÓRICAS:

1. Dos cargas puntuales iguales están separadas por una distancia d.
a) ¿Es nulo el campo eléctrico total en algún punto? Si es así, ¿cuál es la posición de dicho punto?
b) Repetir el apartado a) si las cargas fueran opuestas.

2. Indique si son o no correctas las siguientes frases, justificando las respuestas:
a) Si dos puntos se encuentran al mismo potencial eléctrico, el campo eléctrico en los puntos del segmento que une dichos punto, es nulo.
b) El trabajo necesario para transportar una carga de un punto a otro que se encuentra a distinto potencial eléctrico, es nulo.

3. Una partícula cargada q almacena una energía de **-** 5 J en el interior del campo electrostático creado por otra partícula de carga Q.
a) ¿Q es positiva o negativa? Razonar.
b) ¿La interacción entre Q y q es atractiva o repulsiva? Razonar.

4. Un electrón se mueve con velocidad constante en el sentido positivo del eje OX. Realizar un esquema razonado, indicando la dirección y sentido del campo eléctrico que habría que aplicar para que el electrón:
a) Disminuya su velocidad hasta quedar en reposo.
b) Describa una parábola.
c) Repetir los dos apartados anteriores para el caso de un protón.

5. En una región del espacio el potencial electrostático aumenta en el sentido positivo del eje Z y no cambia en las direcciones de los otros dos ejes. a) Dibujar en un esquema las líneas del campo electrostático y las superficies equipotenciales. b) ¿En qué dirección y sentido se moverá un electrón, inicialmente en reposo?

6. Razonar si la energía potencial electrostática de una carga **q** aumenta o disminuye, al pasar del punto **A** al punto **B**, siendo el potencial en **A** mayor que en **B**. b) El punto **A** está más alejado que el **B** de la carga **Q** que crea el campo. Razonar si la carga **Q** es positiva o negativa.