TEMA 3: INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA

3.1 Interacción electrostática: Ley de Coulomb
3.2 Campo y potencial electrostáticos; energía potencial electrostática.
3.3 Campos electrostáticos creados por cargas puntuales.
3.4 Flujo electrostático. Teorema de Gauss. Cálculo del campo creado por distintas distribuciones de carga.
3.5 Nociones sobre campo electrostático en la materia. Conductores y aislantes.

3.1 INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA: LEY DE COULOMB

3.1.1 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.

3.1.2 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.

3.1.3 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 $\longrightarrow$ 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.

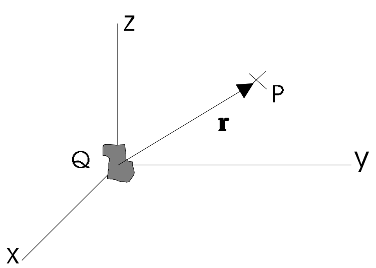
Algunos valores de ε_r	
Vacío:	1
Aire:	1,0006
Polietileno:	2,3
Nylon.	3,7
Madera:	2,5 - 8
Vidrio:	5 - 10
Sal común:	6,1
Alcohol:	28,4
Agua(20ºC):	81

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

Por lo que $\vec{F_e} = K \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \cdot \vec{u_r}$ $K = \frac{K_0}{\varepsilon_r}$

3.2 CAMPO Y POTENCIAL ELECTROSTÁTICO; ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

3.2.1 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 $\mathbf{F_e}$. 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).

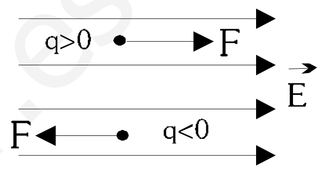
Esta magnitud así obtenida se denomina **Intensidad de Campo Eléctrostático** o **Campo Electrostático** **(E)**

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

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

<u>Efectos del campo eléctrico</u>: 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



3.2.2 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.

3.2.3 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)

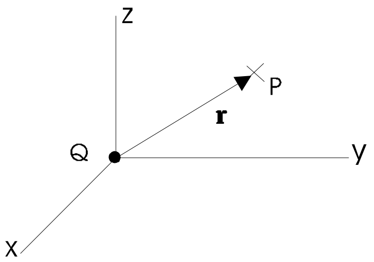
El potencial V es una propiedad del espacio. Es independiente de la carga q que coloquemos en el punto.

- 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.

3.3 CAMPOS CREADOS POR CARGAS PUNTUALES

3.3.1 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.

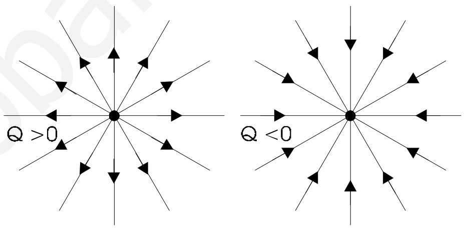
Dado que tanto Q como q son cargas puntuales, la Fuerza vendrá dada por la ley de Coulomb:

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

Campo eléctrico $\vec{E}$: 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



$$E = \frac{K \cdot |Q|}{r^2}$$

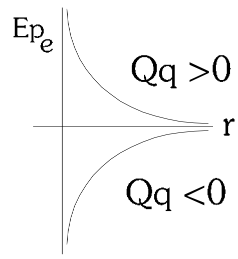
Energía potencial electrostática (Ep_e): Energía almacenada por una carga q colocada en el interior del campo electrostático creado por Q. (esa energía es almacenada por el sistema formado por ambas cargas)

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

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

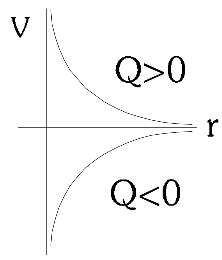
$$= \frac{K \cdot Q \cdot q}{r_B} - \frac{K \cdot Q \cdot q}{r_A}$$ Elegimos origen . Para $r_A \rightarrow \infty$, $Ep_A = 0$. Y la expresión queda

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



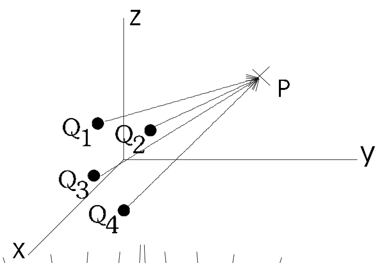
La Ep_e almacenada puede ser positiva o negativa, según el signo de Q y q

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



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

3.3.2 Campo electrostático creado por varias cargas puntuales:



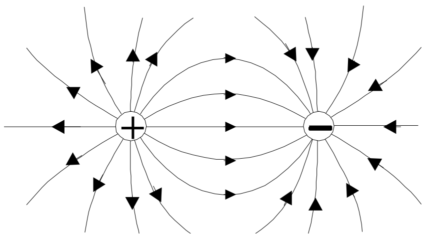
En este caso aplicamos el *principio de superposición* (el efecto producido por un conjunto de cargas puede calcularse sumando los efectos de cada carga por separado). Así

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

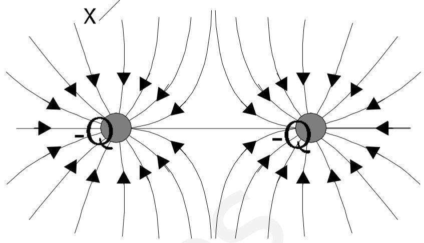
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

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

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

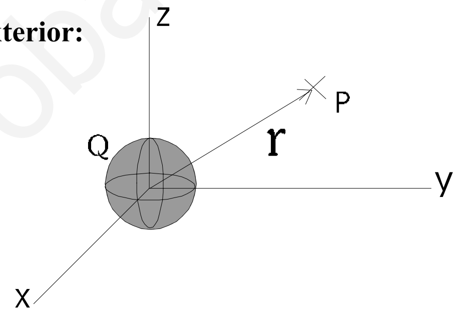


Líneas de campo creado por dos cargas iguales de signo contrario.



Líneas de campo creado por dos cargas iguales del mismo signo. (negativas en este caso)

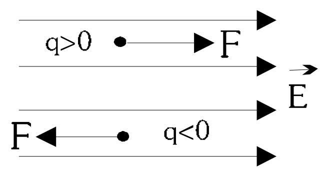
3.3.3 Campo electrostático creado por una esfera cargada en su exterior:



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

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

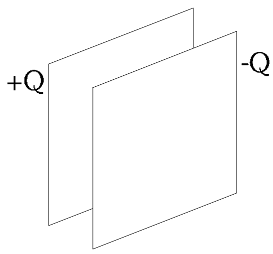
En este caso sólo podemos usar los resultados generales vistos al principio.

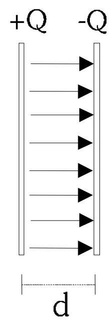


$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ (con lo que $\vec{F} = cte$) $Ep_e = q \cdot V$

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

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.





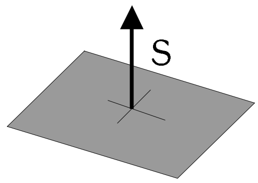
$\vec{E} = cte$ Dirección: perpendicular a las placas
Sentido: de la placa + a la -

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).

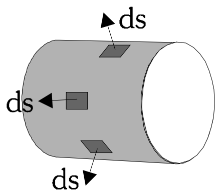
$$\Delta V = V_+ - V_- = E \cdot d$$

3.4 TEOREMA DE GAUSS. APLICACIÓN AL CÁLCULO DE CAMPOS ELECTROSTÁTICOS



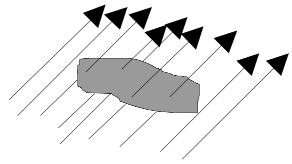
3.4.1 Vector superficie: La forma que tenemos en Física y en geometría de representar las superficies mediante una magnitud es usar el vector superficie ($\vec{s}$). Este vector tiene como características:

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 $\vec{ds}$.

3.4.2 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. $\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot \vec{ds}$ 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 $\Phi_E = \vec{E} \cdot \int_S \vec{ds} = \vec{E} \cdot \vec{S} = E \cdot S \cdot cos\,\alpha$

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

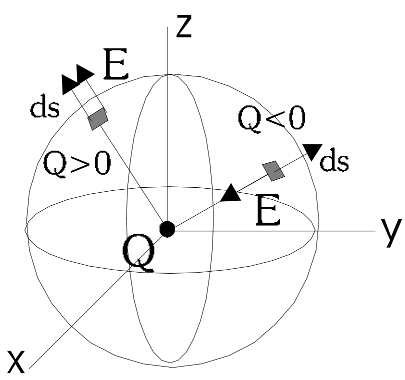
Sabemos la expresión del campo electrostático creado por una carga puntual. $\vec{E} = \frac{K \cdot Q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$

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

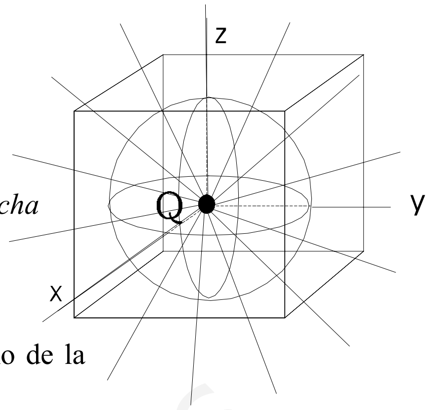
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot \vec{ds} = \int_S E \cdot ds \cdot cos(0^o\, ó\, 180^o) = \pm \int_S E \cdot ds$$

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

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



3.4.3 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>

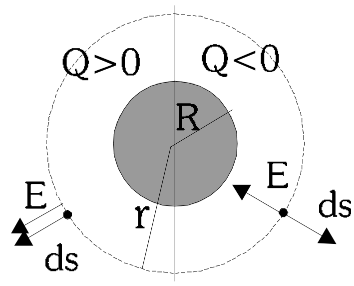
El teorema de Gauss permite calcular la expresión del campo electrostático creado por algunas distribuciones de masa. Deben ser cuerpos que posean cierta simetría (esférica, cilíndrica, plana), en los que podamos tener una idea de la dirección que llevarán las líneas de campo en cada punto.

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:

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



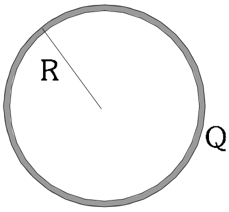
El cuerpo que va a crear el campo tiene simetría esférica. Sabemos que las líneas de campo irán en dirección radial y que el valor del campo dependerá exclusivamente de la distancia al centro de la esfera. La superficie gaussiana que andamos buscando debe ser perpendicular a las líneas de campo y mantener 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.

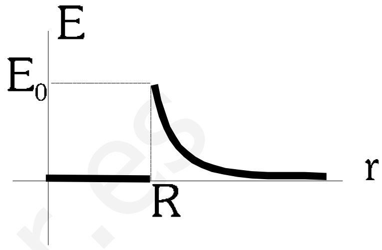
3.4.5 Cálculo de $\vec{E}$ creado por una <u>esfera hueca</u> (la carga está distribuida sólo en la superficie) en su interior:



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.

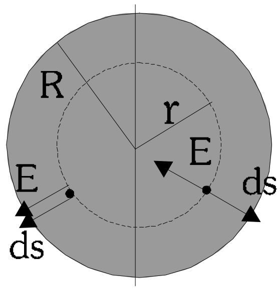
Aplicando el teorema de Gauss al interior, vemos que cualquier superficie cerrada que tomemos, no encerrará ninguna carga, con lo que:

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



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.

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

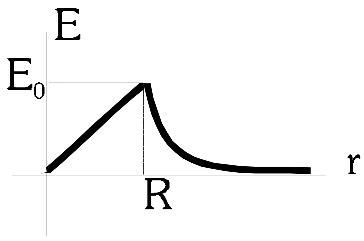


El cuerpo tiene simetría esférica y las líneas de campo van a llevar, por tanto, dirección radial. Como ocurría anteriormente, la superficie gaussiana que usaremos será una esfera de radio *r* (menor que R, en este caso). Aplicamos el teorema de Gauss a esa esfera:

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

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

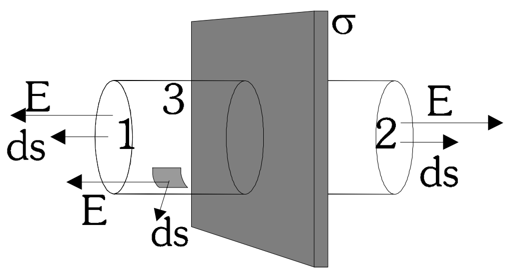
$$Q_{int} = \rho\cdot V_{int} = \frac{Q_{tot}}{V_{tot}}\cdot V_{int} = \frac{Q}{\frac{4}{3}\pi\cdot R^3}\cdot \tfrac{4}{3}\pi\cdot r^3 = \frac{Q\cdot r^3}{R^3}$$



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.

3.4.7 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:

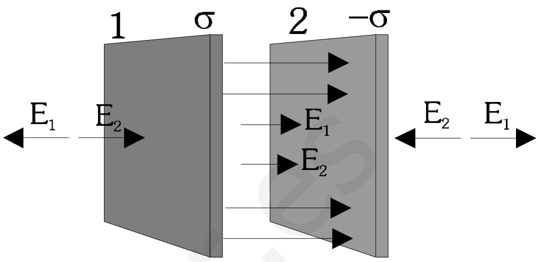
$$\Phi_{tot} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = E \cdot S + E \cdot S + 0 = 2 \cdot E \cdot S = \frac{Q_{int}}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad 2 \cdot E \cdot S = \frac{\sigma \cdot S}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon}$$

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

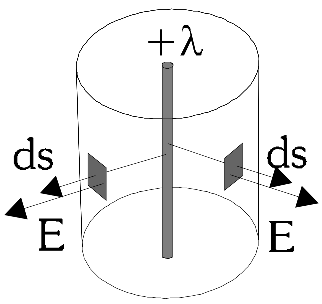
$$E = E_1 + E_1 = 2 \cdot \frac{\sigma}{2\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

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



3.4.8 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 $\lambda = \frac{Q}{L}$



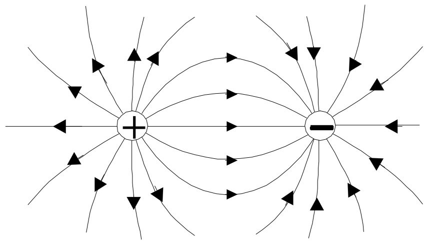
Aplicando el teorema de Gauss:

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

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

3.5 NOCIONES SOBRE CAMPO ELECTROSTÁTICO EN LA MATERIA

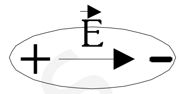
Campo electrostático producido por un dipolo:



Se entiende por dipolo un cuerpo neutro (normalmente una molécula) en el que las cargas positiva y negativa están separadas. Existirá entonces un campo eléctrico entre ambas cargas, cuyo sentido va desde la positiva a la negativa. En el exterior su intensidad disminuye rápidamente, pero puede ser suficiente para poder formar enlace con otras moléculas.

Una sustancia cuyas moléculas son dipolos se dice que es **polar**. Por ejemplo: agua, HCl, NH_3,

En caso contrario será **apolar**. Ejemplos: metano(CH_4), benceno(C_6H_6), oxígeno(O_2)



CONDUCTORES Y AISLANTES:

Podemos hacer una clasificación de las sustancias según su comportamiento frente a un campo eléctrico. Así, distinguimos entre
- Conductores
- Dieléctricos o aislantes

3.5.1 CONDUCTORES:

Pueden conducir la corriente eléctrica.

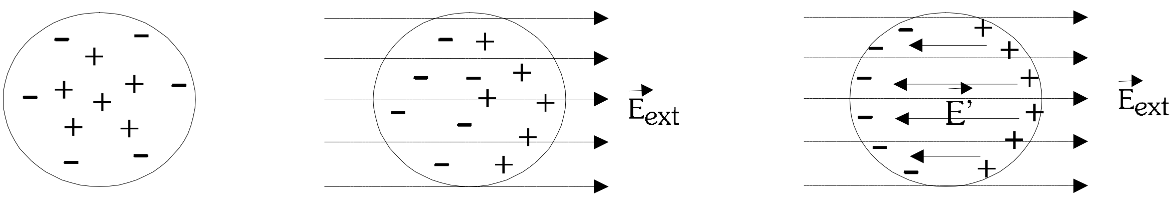
Poseen cargas libres (electrones móviles). Fundamentalmente son metales de transición, con estructura de enlace metálico (los electrones de la subcapa d de los átomos forman una "nube electrónica"). Los mejores conductores: Ag, Cu, Au.

<u>Conductor en equilibrio electrostático</u>: Un conductor está en equilibrio electrostático cuando no hay movimiento de cargas en su interior, es decir, $\sum \vec{F}_e = 0$. Por tanto, si no tenemos fuerza eléctrica neta en el conductor, *el campo eléctrico $\vec{E}$ en el interior del conductor es nulo*. ($\vec{E}_{\text{int}} = 0$).

Si introducimos carga adicional en el conductor (añadimos o quitamos e^-), dichas cargas adicionales sentirán repulsión entre ellas y tenderán a estar lo más alejadas posible. Se llegará a una situación estable, de equilibrio, cuando la cargas añadidas se encuentren distribuidas uniformemente por la superficie del conductor, quedando neutro el interior. Se vuelve a cumplir que $\vec{E}_{\text{int}} = 0$. Al ser E = 0, el potencial V se mantendrá constante.

Al introducir un conductor dentro de un campo eléctrico externo, $\vec{E}_{ext}$, los electrones móviles (carga negativa) se moverán en sentido contrario al campo. Esto produce una separación de carga + y - (dipolo), originándose un campo eléctrico $\vec{E}'$ dentro del conductor, que es igual y de sentido contrario al exterior.

De este modo, el campo en el interior. $\vec{E}_{\text{int}} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}'$



Capacidad de un conductor:

Supongamos un objeto hecho de un material conductor, al que le suministramos una carga Q (positiva o negativa). Sabemos que dicha carga se repartirá uniformemente por la superficie del conductor, y almacenará una determinada energía potencial. El conductor tendrá un cierto valor de potencial V, que se mantiene constante en toda su superficie.

Definimos la Capacidad de un conductor (C) como la relación entre carga acumulada y potencial almacenado por el conductor. Es decir, la capacidad nos indica cuánta carga almacena el conductor por cada voltio de potencial al que se le somete.

$$C = \frac{Q}{V} \qquad \text{Unidades: } [C] = \frac{Coulombio}{Voltio} = Faradio\ (F)$$

Calcularemos la capacidad de un conductor esférico al que hemos suministrado una carga Q. Dicha carga se distribuirá por su superficie , quedando ésta con un potencial V dado por $V = \frac{K \cdot Q}{R} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon \cdot R}$

La capacidad será $C = \frac{Q}{V} = \frac{\cancel{Q}}{\frac{\cancel{Q}}{4\pi\varepsilon \cdot R}} = 4\pi\varepsilon \cdot R$

Como vemos, la capacidad sólo depende de las características del conductor (de su geometría y del material dieléctrico que lo rodee) No depende de la cantidad de carga que le hayamos suministrado. Esto ocurre para cualquier conductor.

Para un *condensador*, la capacidad se define como $C = \frac{Q}{\Delta V}$ (ΔV es la diferencia de potencial entre las placas)

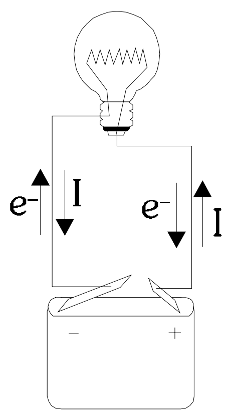
CONDUCTORES EN SITUACIÓN DE NO EQUILIBRIO: CORRIENTE ELÉCTRICA.

Cuando un conductor está en situación de equilibrio, sabemos que:

- Las cargas están en reposo
- $\vec{E}$ en su interior es cero
- V es constante

Pero, ¿Qué ocurre cuando en dos puntos del conductor el potencial es diferente? Pues entre esas dos partes del conductor se creará un campo eléctrico cuyas líneas irán del potencial mayor hacia el menor. Como consecuencia, las cargas móviles (e^-) que posee el material sufrirán una fuerza eléctrica dada por $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$, y se moverán en sentido contrario al del campo eléctrico (es decir, del potencial menor hacia el potencial mayor). Se habrá generado una corriente eléctrica entre ambos puntos del conductor.

En eso consiste básicamente un circuito eléctrico: un material conductor entre cuyos extremos se mantiene una diferencia de potencial que origina el continuo movimiento de los electrones. Esto es lo que ocurre en una linterna, cuando salta un rayo en una tormenta, o cuando nos da calambre al tocar un aparato eléctrico cuando estamos descalzos o con las manos mojadas.



Una vez originada la corriente, el equilibrio se restablecería en breves instantes y los potenciales se igualarían, a menos que de alguna forma mantengamos la diferencia de potencial. Un aparato que ejerza esta función es un *generador*, y mantiene la diferencia de potencial por procedimientos químicos (pila, batería) o físicos (alternador, dinamo).

Intensidad de corriente: Actualmente sabemos que la corriente eléctrica consiste en un movimiento de electrones desde puntos de menor potencial a otros de mayor potencial. Pero la corriente eléctrica se estudiaba ya antes del descubrimiento de los electrones. Inicialmente se creyó que eran cargas positivas lo que circulaban por el circuito, y se consideró que la corriente circulaba desde los potenciales altos a los bajos (del polo + al – de la pila). Posteriormente, cuando se descubrieron los electrones y su movimiento real, ya no se cambió el criterio y se mantuvo el estudio de la corriente como si fueran cargas positivas.

La *intensidad de corriente* que circula por un punto del circuito (I) se define como la cantidad de carga eléctrica que pasa por ese punto en la unidad de tiempo (en cada segundo). Así, $I = \frac{Q}{t}$. Unidades: $[I] = \frac{C}{s} = A$, amperio.

El voltaje (ΔV), o diferencia de potencial entre dos puntos del circuito, se corresponde con la energía que consume cada unidad de carga (cada C) cuando pasa de un punto a otro del circuito.

Desde el punto de vista energético, las cargas (consideradas +), al desplazarse desde un punto donde hay mayor potencial a otro de menor V (donde almacenan menos energía), pierden energía, que es consumida en los aparatos eléctricos conectados (o en el propio cable si no hay ningún aparato, con lo que se calentará, pudiendo llegar a quemarse su envoltura plástica; es lo que pasa en un cortocircuito). El generador (la pila, batería, toma de corriente...) vuelve a suministrar energía a las cargas eléctricas para que continúen circulando.

3.5.2 DIELÉCTRICOS (AISLANTES):

No poseen electrones móviles. Normalmente son compuestos covalentes. Los electrones están restringidos a un átomo o molécula, siendo muy difícil que puedan circular por el material. Por tanto, no pueden conducir la corriente eléctrica.

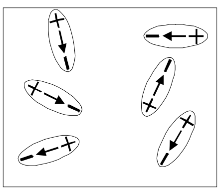
Según el tipo de molécula distinguimos dos tipos:

Dieléctricos polares: Sus moléculas son dipolos, tienen cargas separadas y campo eléctrico interno.

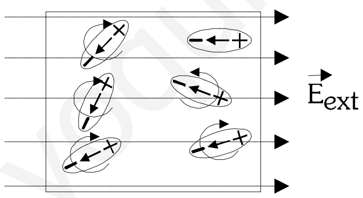
Dieléctrico apolares: En sus moléculas no existe separación de cargas, no son dipolos.

Al introducir una sustancia dieléctrica en el interior de un campo eléctrico externo, se produce el fenómeno de polarización del dieléctrico. Vemos el proceso en el siguiente esquema:

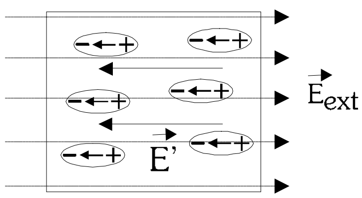
DIELÉCTRICO POLAR:



Al principio los dipolos están desordenados ($\mathbf{E_{int}}$ =0)

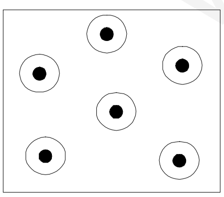


Se introduce $\mathbf{E_{ext}}$.
Orientación de dipolos

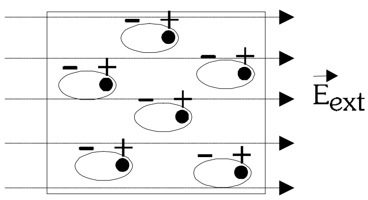


Se origina **E'** en sentido contrario a $\mathbf{E_{ext}}$

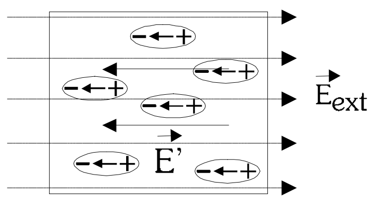
DIELÉCTRICO APOLAR:



Al principio no existen dipolos ($\mathbf{E_{int}}$ =0)



Se introduce $\mathbf{E_{ext}}$.
Separación de cargas
Formación de dipolos



Se origina **E'** en sentido contrario a $\mathbf{E_{ext}}$

En ambos casos se crea un campo inducido E' que se opone al campo exterior. A diferencia de lo que ocurría en los conductores, en los dieléctricos las cargas + y - no llegan a separarse completamente, por lo que el campo E' es menor que el Eext.

De este modo *el campo interior se hace más pequeño que el exterior*, pero no se hace cero.

$$\vec{E}_{int} = \vec{E}_{ext} + \vec{E}' \quad ; \text{ en módulo } \quad E_{int} = E_{ext} - E' \quad ; \quad E_{int} < E_{ext}$$

Ruptura del dieléctrico:

Hemos visto que, al polarizar el dieléctrico, las cargas positiva y negativa de cada molécula tienden a separarse. Cuanto mayor es el campo eléctrico externo, mayor estiramiento se producirá en la molécula. ¿Podremos aumentar indefinidamente el campo o existirá un límite? Pues ocurre lo segundo, es decir, llegará un momento (un valor máximo de $\vec{E}_{ext}$) en que las moléculas no podrán estirarse más y se romperán, quedando libres los electrones. Se habla entonces de *ruptura del material dieléctrico*. De hecho, se ha convertido en un conductor, y circulará corriente a través de él (es lo que ocurre cuando salta un rayo a través del aire en una tormenta, o una chispa entre dos cables muy próximos). El valor del campo $\vec{E}$ a partir del cual ocurre esto se denomina *campo de ruptura*. Para el aire seco es de $3 \cdot 10^6$ V/m aprox.