TEMA 2. CAMPO ELÉCTRICO

CONTENIDOS:

- Campo eléctrico.
- Intensidad del campo.
- Potencial eléctrico.
- Flujo eléctrico y Ley de Gauss. Aplicaciones

2.- CAMPO ELÉCTRICO	1. Asociar el campo eléctrico a la existencia de carga y caracterizarlo por la intensidad de campo y el potencial. CMCT, CAA. 2. Reconocer el carácter conservativo del campo eléctrico por su relación con una fuerza central y asociarle en consecuencia un potencial eléctrico. CMCT, CAA. 3. Caracterizar el potencial eléctrico en diferentes puntos de un campo generado por una distribución de cargas puntuales y describir el movimiento de una carga cuando se deja libre en el campo. CMCT, CAA. 4. Interpretar las variaciones de energía potencial de una carga en movimiento en el seno de campos electrostáticos en función del origen de coordenadas energéticas elegido. CMCT, CAA, CCL. 5. Asociar las líneas de campo eléctrico con el flujo a través de una superficie cerrada y establecer el teorema de Gauss para determinar el campo eléctrico creado por una esfera cargada. CMCT, CAA. 6. Valorar el teorema de Gauss como método de cálculo de campos electrostáticos. CMCT, CAA. 7. Aplicar el principio de equilibrio electrostático para explicar la ausencia de campo eléctrico en el interior de los conductores y lo asocia a casos concretos de la vida cotidiana. CSC, CMCT, CAA, CCL.	1.1. Relaciona los conceptos de fuerza y campo, estableciendo la relación entre intensidad del campo eléctrico y carga eléctrica. 1.2. Utiliza el principio de superposición para el cálculo de campos y potenciales eléctricos creados por una distribución de cargas puntuales 2.1. Representa gráficamente el campo creado por una carga puntual, incluyendo las líneas de campo y las superficies de energía equipotencial. 2.2. Compara los campos eléctrico y gravitatorio estableciendo analogías y diferencias entre ellos. 3.1. Analiza cualitativamente la trayectoria de una carga situada en el seno de un campo generado por una distribución de cargas, a partir de la fuerza neta que se ejerce sobre ella. 4.1. Calcula el trabajo necesario para transportar una carga entre dos puntos de un campo eléctrico creado por una o más cargas puntuales a partir de la diferencia de potencial. 4.2. Predice el trabajo que se realizará sobre una carga que se mueve en una superficie de energía equipotencial y lo discute en el contexto de campos conservativos. 5.1. Calcula el flujo del campo eléctrico a partir de la carga que lo crea y la superficie que atraviesan las líneas del campo. 6.1. Determina el campo eléctrico creado por una esfera cargada aplicando el teorema de Gauss. 7.1. Explica el efecto de la Jaula de Faraday utilizando el principio de equilibrio electrostático y lo reconoce en situaciones cotidianas como el mal funcionamiento de los móviles en ciertos edificios o el efecto de los rayos eléctricos en los aviones.

1.- INTRODUCCIÓN

La materia esta constituida por partículas elementales caracterizadas cada una de ellas por una serie de magnitudes entre las que se encuentra la carga eléctrica. Esta naturaleza eléctrica de la materia será uno de los aspectos que trataremos en el tema.
Por otro lado, los fenómenos de interacción entre cargas, de los que se encarga la electrostática, se estudiarán haciendo el estudio energético de dichas interacciones y teniendo en cuenta el carácter conservativo del campo electrostático.

2.- NATURALEZA ELÉCTRICA DE LA MATERIA.

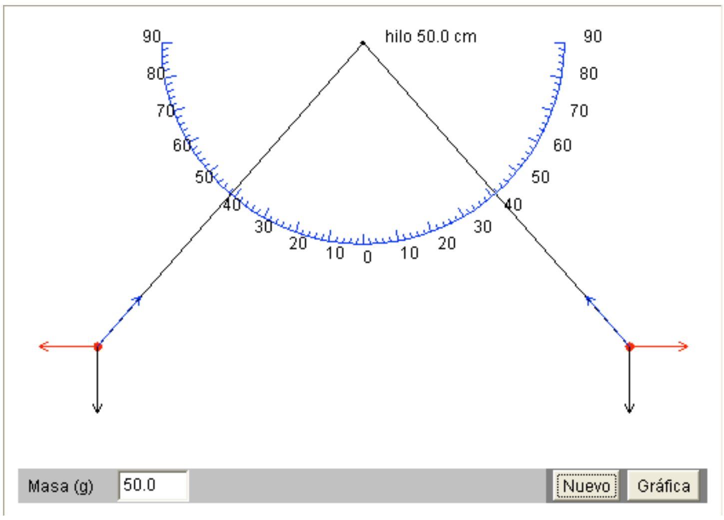
Desde el punto de vista del electromagnetismo clásico podemos considerar los átomos formados por un núcleo donde se encuentran los protones de carga positiva y neutrones de carga nula. Es en el núcleo donde se concentra casi la totalidad de la masa atómica. En el exterior del núcleo se encuentran los electrones de igual carga que los protones pero negativa.
De esta forma podemos decir que toda materia contiene carga pero si el número de carga positiva es igual al número de carga negativa, el cuerpo será eléctricamente neutro. Si existe algún exceso de carga el cuerpo se considera cargado eléctricamente del signo que tiene ese exceso de carga.
Experiencias como la de frotamiento entre 2 cuerpos tiene como resultado la transferencia de carga de uno a otro de tal forma que el que pierde carga se queda cargado positivamente (por pérdida de electrones) y el que recibe la carga estará cargado negativamente. Este fenómeno de pérdida y ganancia de electrones se denomina **ionización**.

3.- ELECTROSTÁTICA. LEY DE COULOMB.

Si tenemos dos cuerpos cargados electrostáticamente, entre ellos aparecerá una fuerza de interacción electrostática.
Coulomb, utilizando una balanza de torsión, comprobó que la fuerza de atracción o de repulsión que ejercen entre si dos cargas depende del valor absoluto de ambas cargas, Q y q, y de la distancia, r, que las separa. Con ello obtuvo la que se conoce como ley de Coulomb de la electrostática:

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

La interacción 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.



http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/campo_electrico/fuerza/fuerza.htm

En esta expresión, K es una constante que depende del medio caracterizado por la constante dieléctrica o permitividad eléctrica del medio:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_r \varepsilon_0} \qquad \text{en el vacío: } \varepsilon_r = 1$$

K = $9\cdot10^9$ Nm^2/C^2 cuando el medio en que se encuentran los cuerpos cargados es el vacío o el aire seco. En este medio la permitividad relativa es 1.
Para el vacío se representa por ε_0 y se relaciona con K mediante la expresión:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \Rightarrow \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot K} = 8{,}84 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$$

Si en una región del espacio hay varios cuerpos cargados eléctricamente, cada uno interaccionará con todos los demás y, de acuerdo con el **principio de superposición**, la fuerza ejercida sobre cada uno de ellos será la resultante de las fuerzas de interacción electrostática que ejercen los otros cuerpos sobre él.

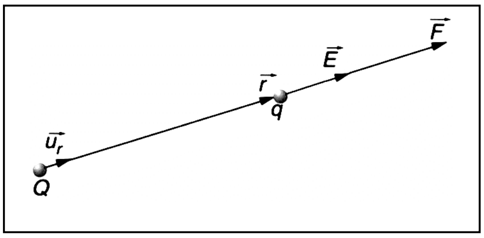
4.- CAMPO ELÉCTRICO.

Según la ley de Coulomb una carga cualquiera ejercerá una fuerza sobre otra carga que se aproxime. Se dice entonces que toda carga crea un campo eléctrico a su alrededor de tal forma que una carga situada en él está sometida a una fuerza eléctrica.

Se define la **intensidad del campo eléctrico** en un punto como la fuerza por unidad de carga que el campo ejerce sobre la carga situada en dicho punto.

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

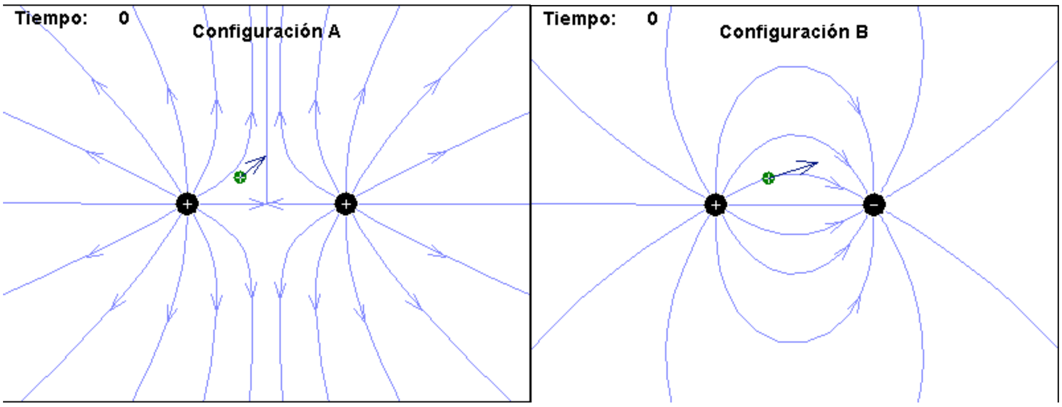
De acuerdo con la definición: $F = +K\frac{Q\cdot q}{r^2}\hat{u}_r$; obtenemos: $\vec{E} = +K\frac{Q}{r^2}\hat{u}_r$



siendo $\vec{E}$ el vector intensidad del campo eléctrico, al que denominamos, simplemente, **campo eléctrico**. El vector unitario indicará la dirección y sentido del campo eléctrico.

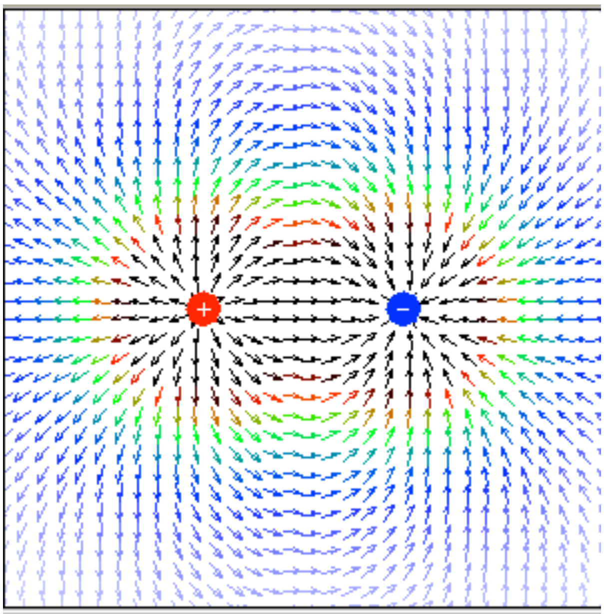
Para el campo creado por una carga Q, esta magnitud es función exclusiva de la distancia r a que nos encontremos de Q. Su unidad SI es N/C.

Con el fin de visualizar de algún modo la estructura del campo eléctrico asociado a una distribución de carga, Faraday introdujo el concepto de **líneas de fuerza**. Una línea de fuerza es una línea imaginaria a la que en cada punto es tangente el vector intensidad de campo eléctrico definido en dicho punto. Las líneas de fuerza del campo **E** tienen, por lo tanto, la misma dirección y sentido en cualquier punto que el propio vector **E(r)**. Con un sentido más intuitivo puede decirse de ellas que corresponden a las trayectorias que seguirán las partículas positivas abandonadas a la influencia del campo. Las cargas negativas al abandonarlas en un campo eléctrico, se mueven en sentido contrario a las líneas del campo.



http://www.um.es/fem/Fislets/CD/II4Electromagnetismo/II19CampoElectrico/default.html

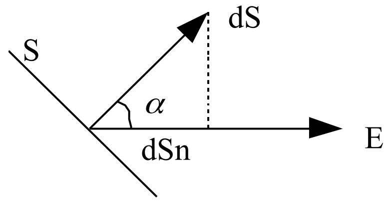
Las líneas de campo eléctrico de una carga puntual son radiales y uniformemente distribuidas alrededor de la carga. Con sentido hacia fuera de la carga las originadas por cargas positivas (**fuentes** de líneas de fuerza) y hacia la carga las originadas por cargas negativas (**sumideros** de líneas de fuerza).


http://www.um.es/fem/Fislets/CD/II4Electromagnetismo/II19CampoElectrico/default.html

El número total de líneas de campo eléctrico de una carga puntual es proporcional a la cantidad de carga. A mayor número de líneas de campo representadas en una región del campo eléctrico, mayor intensidad del mismo, consecuencia de un concepto más general llamado **flujo de campo eléctrico.**

Si suponemos que en una región del espacio existe un campo E y una superficie elemental dS, se define el flujo elemental del campo a través de dicha superficie al producto escalar: $d\phi = \vec{E} \cdot d\vec{S}$

Es decir, igual al producto del módulo del campo por la proyección de la superficie sobre un plano normal a la dirección del campo:



$$d\phi = E \cdot dS \cdot \cos\alpha = E \cdot dS_n$$

Puesto que la densidad de líneas de campo es directamente proporcional al módulo del mismo, se concluye que el flujo elemental representa el número de líneas de campo que atraviesan un elemento de superficie normal al campo.

Para calcular el flujo total a través de una superficie cerrada (que encierra un volumen) S, se integra el flujo elemental para toda la superficie cerrada:
(recordamos que el vector superficie es siempre positivo en el sentido saliente de la superficie). Si el flujo neto de líneas de campo resultara negativo daría cuenta de líneas de campo entrantes en la superficie.

La descripción cualitativa del campo eléctrico mediante líneas de campo está relacionada con la ecuación matemática denominada **ley de Gauss**, que relaciona la intensidad del campo eléctrico sobre una superficie cerrada con la carga neta incluida dentro de la superficie. Esta ley tiene ventajas significativas frente a la ley de Coulomb de la intensidad del campo eléctrico, pues:
- Permite cálculos de intensidades de campo relativamente fáciles para ciertas distribuciones de carga.
- Suministra una visión particularmente clara de ciertas propiedades básicas del campo.
- Es aplicable a cualquier distribución de carga, independientemente de su estado de movimiento, lo que sirve, a su vez, para definir la cantidad de carga neta en una región.

Matemáticamente, la ley de Gauss para el campo eléctrico es:

$$\phi_{neto} = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{neta}}{\varepsilon_0}$$

Que expresa pues que el flujo eléctrico total a través de una superficie gaussiana es igual a la carga eléctrica neta en el interior de dicha superficie dividida entre la permitividad del medio y también igual a la integral del campo eléctrico a la largo de dicha superficie.

Entre las aplicaciones que comentamos anteriormente veremos:

- Situación de la carga en un conductor cargado.
- Cálculo de campos electrostáticos.

- *La carga neta de un conductor cargado se acumula en su superficie*. En efecto, si el conductor esta cargado, aislado y en equilibrio, el campo en su interior ha de ser nulo, pues de no serlo, las cargas libres se desplazarían bajo su influencia en contra de la hipótesis de equilibrio electrostático. Pues bien, siempre es posible considerar una superficie gaussiana situada en el interior del conductor, de modo que el campo en su interior sea nulo. Si E=0, de acuerdo con el teorema de Gauss, Qint =0 y no existirá carga neta. Dado que la superficie gaussiana puede situarse hasta limitar interiormente a la superficie del conductor, y puesto que la carga ha de estar en algún sitio, concluimos que ésta residirá en su superficie.

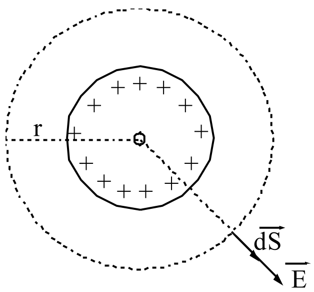
- La ley de Gauss también nos permite el *cálculo sencillo de campos electrostáticos en condiciones de suficiente simetría*. En tal caso se elige una superficie gaussiana (imaginaria y cerrada) que pase por el punto en cuestión y envuelva a la distribución de carga. Sólo si la geometría de la distribución es suficientemente simétrica, será posible despejar la componente radial del campo y sacarla fuera de la integral, ya que en tal caso E será la misma en todos los puntos de S, de forma que resultara:

$$\phi = \oint_s \vec{E} \cdot dS = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} \Rightarrow E \cdot \oint_s d\vec{S} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} \Rightarrow \vec{E} \cdot \vec{S} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0 \cdot S}$$

Decimos que la superficie gaussiana debe cumplir dos condiciones:
- Que el campo sea normal a dicha superficie.
- Que el área de la superficie sea conocida.

EJEMPLOS:

1) Campo eléctrico creado por una esfera uniformemente cargada.



Supongamos una esfera con carga uniformemente repartida y queremos hallar la intensidad de su campo en un punto A que dista r del centro de la esfera.
Trazamos por A otra superficie esférica concéntrica con la esfera dada. Por simetría el campo es radial y constante en cada punto de la superficie gaussiana elegida.

El flujo a través de la superficie esférica es:

$$\phi = \int E \cdot dS = E \cdot \int dS = E \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

También sabemos que este flujo según el teorema de Gauss tiene valor:

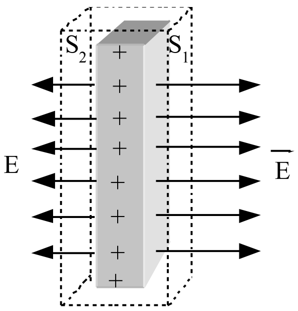
$$\phi = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_o}$$

De ambas expresiones se deduce que: $E = \dfrac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o} \dfrac{Q_{\text{int}}}{r^2}$

Observamos que el campo de una carga Q distribuida uniformemente por una esfera es el mismo que el de una carga puntual del mismo valor colocada en el centro de la esfera.

2) Campo creado por un plano indefinido cargado uniformemente.

La superficie gaussiana elegida en este caso es la de un paralelepípedo.



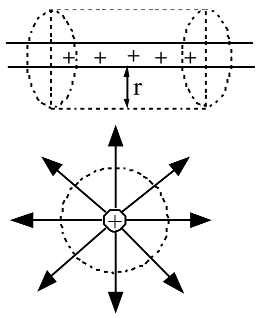
Solamente hay flujo a través de las caras S_1 y S_2 paralelas al plano. No olvides que se trata de un plano cargado. Por tanto, sin espesor.
Aplicando el teorema de Gauss tenemos:

$$\phi = \int_{S1} E \cdot dS + \int_{S2} E \cdot dS = E \cdot S_1 + E \cdot S_2 = 2 \cdot E \cdot S = \frac{Q}{\varepsilon_o}$$

luego el campo vale: $E = \dfrac{Q}{2 \cdot S \cdot \varepsilon_o}$

De esta expresión se deduce que:
- El campo de un plano cargado es independiente de la distancia
- El campo es uniforme. Las líneas son paralelas y perpendiculares a la superficie cargada.

3) Campo eléctrico creado por un hilo conductor cargado e indefinido.



Para hallar el campo creado por este hilo en un punto A, utilizamos como superficie gaussiana una superficie cilíndrica con el centro en el hilo considerado, y cuya generatriz pase por el punto A.
El campo es radial, como se indica en la figura b), que representa una sección transversal del cilindro.

Si aplicamos el teorema de Gauss tenemos:

$$\phi = E \cdot \int dS = \frac{Q}{\varepsilon_o} \Rightarrow E \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L = \frac{Q}{\varepsilon_o}$$

luego;

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \varepsilon_o}$$

Una vez realizado el tratamiento vectorial del campo electrostático comenzaremos el **tratamiento escalar** a través de los conceptos de energía potencial eléctrica y potencial electrostático que nos permitirá comprender el carácter conservativo del campo eléctrico y realizar el estudio energético de las interacciones electrostáticas.

5.- CARÁCTER CONSERVATIVO DEL CAMPO ELECTROSTÁTICO

Consideremos dos cargas eléctricas puntuales q_1 y q_2. Si q_1 está fija y q_2 se mueve desde la posición A hasta la posición B bajo la acción únicamente de la fuerza eléctrica de q_1 sobre q_2, puesto que q_2 experimenta un desplazamiento por acción de una fuerza, ésta realiza trabajo eléctrico sobre q_2. Este trabajo, se puede expresar como diferencia de una función escalar denominada Energía Potencial que depende de la posición:

$$W_{A\to B} = \int_A^B \vec{F} \cdot dr = K \cdot q_1 \cdot q_2 \int_A^B \frac{1}{r^2} dr = K \cdot q_1 \cdot q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = K \frac{q_1 q_2}{r_A} - K \frac{q_1 q_2}{r_B} =$$

$$= U_A - U_B = -\Delta U$$

Debido a esta expresión del trabajo, se dice que la fuerza eléctrica es **conservativa**.
El carácter conservativo tiene varias consecuencias:
- El trabajo de la fuerza eléctrica sólo depende de las posiciones inicial y final des desplazamiento que produce y no del camino elegido para ello.
- El trabajo de la fuerza eléctrica para el desplazamiento de una carga en una trayectoria cerrada es nulo debido a que los valores iniciales y finales de la energía potencial coincidirían.
- No podemos hablar de la energía potencial de una carga particular sino de la energía potencial del sistema de carga que interacciona. Asimismo, tan sólo se pueden calcular variaciones de energía potencial.

Este último aspecto lo desarrollaremos con el estudio energético de las interacciones electrostáticas.

6.-ESTUDIO ENERGÉTICO DE LAS INTERACCIONES ELECTROSTÁTICAS.

Habitualmente se trabaja con energías potenciales U, en lugar de las variaciones de energía potencial. Puesto que la física clásica a lo sumo permite calcular variaciones de energía potencial y no sus valores absolutos, lo que se hace es definir una energía potencial de referencia, siendo lo usual tomar energía potencial nula cuando la distancia de separación es infinita.
Así, hacemos que q_2 se desplace desde A hasta el infinito y hagamos $U_{inf} = 0$. Para ello basta con sustituir R_b por infinito en la expresión de la variación de energía potencial

$$U_A - 0 = K \cdot q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{\infty} \right)$$

Es decir:

$$U_A = K \frac{q_1 q_2}{r_A}$$

Expresión que podemos reescribir sin hacer referencia al punto concreto A como:

$$U = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \qquad (U=0 \quad \text{para} \quad r = \infty)$$

Siendo R_{12} la distancia entre q_1 y q_2.
En cuanto al significado de U_e podemos interpretarlo como el trabajo realizado por el campo eléctrico cuando la carga q_2 se desplaza desde la posición R_{12} hasta el infinito, manteniendo fija q_1.

Pero también admite la interpretación inversa respecto a la carga que se mueve. El trabajo realizado por el campo eléctrico cuando la carga q_1 se desplaza desde la posición R_{12} hasta el infinito, manteniendo fija a q_2. En ambos casos, independientemente del camino seguido por la carga que en ese momento se mueve.

En cuando a los valores numéricos de U_e, pueden ser:
- Positivos, cuando las cargas tienen el mismo signo. En este caso U_e disminuye al aumentar la separación entre cargas. Esto es coherente, pues las cargas se repelen y evolucionan, bajo la acción del campo, hacia energías potenciales menores.
- Nulos, cuando la distancia de separación entre cargas es infinita.
- Negativos, si las cargas tienen distinto signo. En ese caso U_e disminuye al aproximarse las cargas, ya que se atraen.

La descripción vectorial del campo eléctrico la realizábamos a través de dos magnitudes: una, la fuerza eléctrica, que depende de dos cargas, y la otra, la intensidad del campo eléctrico, que depende de la carga fuente. Pues bien, en el tratamiento escalar realizado hasta aquí se ha encontrado la energía potencial eléctrica, que depende de dos cargas, es decir, el equivalente a la fuerza eléctrica en la descripción vectorial. Nos falta, entonces, la magnitud escalar que dependa de una sola carga, esto es, el **potencial electrostático**. Para deducirlo, seguiremos un camino similar al de la obtención de la intensidad de campo a partir de la fuerza: obteníamos la intensidad de campo dividiendo la fuerza sobre la carga de prueba entre la carga de prueba.

Si la energía potencial eléctrica de un sistema formado por dos cargas puntuales, q y q´, separadas una distancia r es: $U = K\frac{q \cdot q'}{r}$

Definimos el <u>potencial electrostático (o potencial escalar)</u> V como la energía potencial eléctrico por unidad de carga de la carga de prueba q´:

$$V = \frac{U}{q'}$$

Por lo que al dividir entre q´ se obtiene $V = K\frac{q}{r}$ Tomando V = 0 para R = infinito.

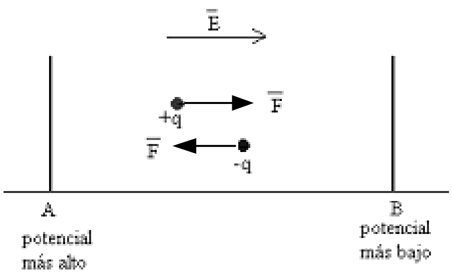
Teniendo en cuenta la definición de V y la expresión de la energía potencial relacionada con el trabajo obtenemos la interpretación del potencial eléctrico en un punto: representa el trabajo eléctrico por unidad de carga de prueba positiva que realiza el campo eléctrico sobre dicha carga para trasladarla desde el citado punto hasta el infinito:

$$V = \frac{W_{A\to B}}{q'} = \frac{U}{q'} \Rightarrow U = q'V$$

La unidad de potencial eléctrico en el SI es J/C que se denomina **voltio** (V).

También podemos relacionar el trabajo con el potencial recordando que:

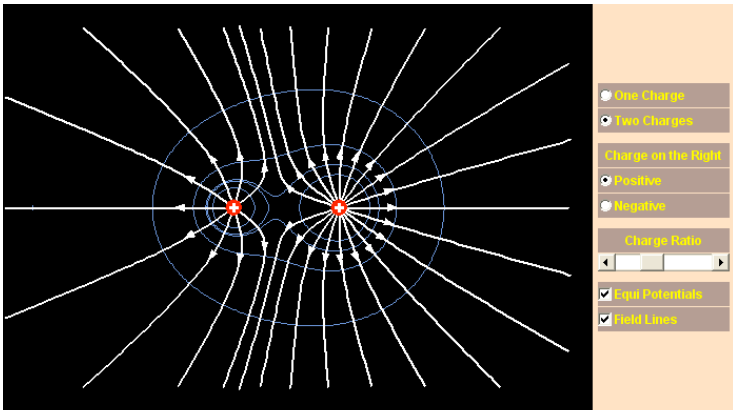
$$W_{A\rightarrow B} = -\Delta U = U_A - U_B = q^{'}V_A - q^{'}V_B = q^{'}(V_A - V_B)$$



Teniendo en cuenta los valores numéricos del trabajo y su significado podemos hacer las siguientes conclusiones:

- Las cargas de prueba positivas al abandonarlas en un campo eléctrico, se mueven hacia potenciales decrecientes.
- Las cargas de prueba negativas al abandonarlas en un campo eléctrico, se mueven hacia potenciales crecientes.

Un último concepto relacionado con el potencial eléctrico son las **superficies equipotenciales**, definidas como aquellas en las que el potencial se mantiene constante.

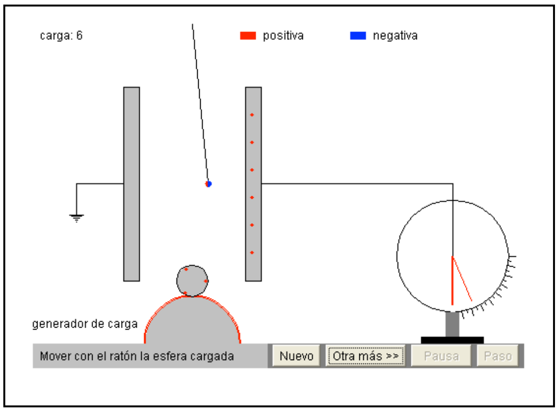


http://www.surendranath.org/Applets/Electricity/FieldLines/FieldLinesApplet.html

El trabajo para desplazar una carga de prueba sobre estas superficies será entonces nulo. Se deduce entonces que para que esto ocurra, el vector campo eléctrico E debe ser perpendicular a dichas superficies, o lo que es lo mismo, las líneas de campo son perpendiculares a las superficies equipotenciales.

Esta consecuencia se expresa matemáticamente mediante la relación diferencial entre el potencial y el campo eléctrico:

$$dV = - E\cdot dr$$



http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/elecmagnet/campo_electrico/pendulo/pendulo.htm

CAMPO ELÉCTRICO

Ley de Coulomb: $\vec{F} = +K \frac{Q \cdot q}{r^2} \hat{u}_r$

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}$$

en el vacío: $\varepsilon_r = 1$ → $K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \Rightarrow \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot K} = 8{,}84 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$

Intensidad de campo eléctrico: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ → $\vec{E} = +K \frac{Q}{r^2} \hat{u}_r$

Q = carga que crea el campo
q = carga que siente el campo

Ley de Gauss: $\phi_{neto} = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q_{neta}}{\varepsilon_0}$

1) Campo eléctrico creado por una esfera uniformemente cargada.

$$E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o} \frac{Q_{\text{int}}}{r^2}$$

2) Campo creado por un plano indefinido cargado uniformemente.

$$E = \frac{Q}{2 \cdot S \cdot \varepsilon_o}$$

3) Campo eléctrico creado por un hilo conductor cargado e indefinido.

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \varepsilon_o}$$

Trabajo realizado por el campo eléctrico para separar dos cargas una distancia r_B cuando en un principio estaban separadas una distancia r_A:

$$W_{A \to B} = \int_A^B \vec{F} \cdot dr = K \cdot q_1 \cdot q_2 \int_A^B \frac{1}{r^2} dr = K \cdot q_1 \cdot q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) = K \frac{q_1 q_2}{r_A} - K \frac{q_1 q_2}{r_B} =$$

$$= U_A - U_B = -\Delta U$$

Energía potencial eléctrica: $U = K \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$ (U = 0 para $r = \infty$)

Potencial eléctrico: $V = \frac{U}{q}$ → $V = K \frac{Q}{r}$

$$W_{A \to B} = -\Delta U = U_A - U_B = q \cdot V_A - q \cdot V_B = q \cdot (V_A - V_B)$$

Relación Potencial / Campo eléctrico: dV = - E·dr