

Carga, fuerza y campo eléctrico
Cuarto año medio

Los procesos naturales, en física, se tratan de entender y explicar desde las interacciones entre las partículas fundamentales. Por ejemplo, la gravedad se trata de explicar mediante las interacciones entre gravitones, las interacciones fuertes debido a las partículas llamadas gluones, mientras que la interacción débil se relaciona con las partículas W^+ , W^- y Z^0 . En el caso del electromagnetismo, área de la física que se estudiará en este 4º medio, se relaciona con la interacción de los fotones, partículas que generan fenomenología cuando interaccionan con la carga eléctrica, dando así origen a la fuerza electromagnética.

En este curso, iniciaremos el estudio de los fenómenos eléctrico estudiando los cuerpos cargados y como ellos modifican su entorno. Para entender estos conceptos, se debe definir conceptualmente la carga eléctrica y de que está compuesta, que son las partículas subatómicas.

Las partículas subatómicas

En general, Usted en cuarto medio conoce 4 partículas subatómicas (de las muchas que existen) que son el fotón, el protón, el neutrón y el electrón. Este último es el responsable de la mayoría de las interacciones eléctricas y magnéticas en la naturaleza, ya que es la partícula que puede moverse libremente, ya que los protones y los neutrones están en el núcleo atómico.

Toda partícula posee dos características: su masa (relacionada con su energía) y su carga eléctrica. A continuación se presenta un cuadro que establece las distintas cantidades asociadas a cada partícula

PARTICULA	SIMBOLO	CARGA ELECTRICA	MASA
Electrón	e^-	$q = -1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$	$9.10956 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Protón	p	$q = +1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Neutrón	n	$q = 0$	$1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Partículas y carga eléctrica

1

Cabe destacar que el fotón (símbolo γ) posee masa y carga iguales a 0. Nótese que la unidad de la carga eléctrica es el Coulomb [C], en honor a Charles Agustín de Coulomb, físico que cuantificó la fuerza eléctrica entre dos cuerpos cargados, objeto de estudio en algunas páginas más adelante. Además, se puede observar que el electrón es casi 1000 veces menos másico que el protón, por lo que un protón NO es la antipartícula del electrón. La antipartícula del electrón es el positrón (e^+), antipartícula con los mismo valores de masa y carga del electrón, pero con signos contrarios.

¹ Imagen original en <https:// analisisdecircuitos1.wordpress.com/parte-1-circuitos-resistivos/capitulo-7-carga-electrica/>

La carga eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad de los materiales relacionada con la cantidad de electrones en exceso o carencia de ellos. La capacidad de movimiento de los electrones de valencia (aquellos electrones más alejados del núcleo atómico y fácil de remover) hace que los cuerpos puedan tener carga eléctrica negativa (exceso de electrones en el cuerpo) o carga eléctrica positiva (falta de electrones en el cuerpo). La carga eléctrica siempre se relaciona con el número de electrones, ya que los protones no se pueden mover (en electrónica si se consideran móviles). Esta cantidad se identifica con la letra Q, se mide en coulombs [C], y puede determinarse como

$$Q = nq_e-$$

Donde n es el número de electrones y q_e- la carga fundamental del electrón. Esta ecuación se denomina como cuantización de la carga, ya que n tiene valores de enteros positivos (0,1,2...) ya que usted no puede remover 0,5 electrones del átomo; n siempre tiene valores enteros positivos.

Antes de seguir...conteste las siguientes preguntas

¿Cuáles son las interacciones fundamentales de la naturaleza?, ¿Qué fenómenos explican?. Investigue.

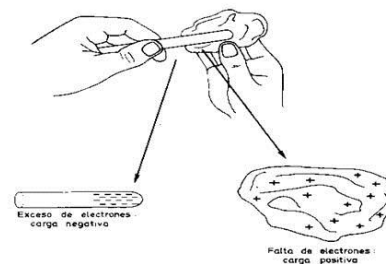
Un cuerpo posee una carga de $-5,0[\mu C]$. ¿Cuántos electrones en exceso posee?

Un cuerpo posee $3,0 \times 10^{-5}$ electrones de carga. ¿es posible esta afirmación?. Justifique.

Procesos de electrización

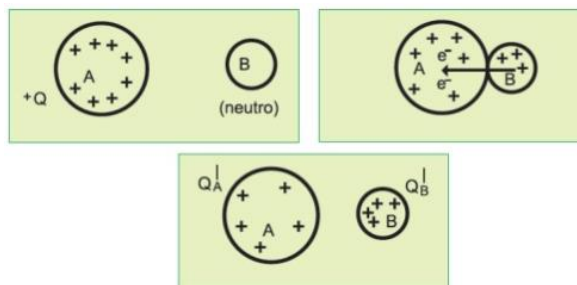
Esto son los procesos que se utilizan para ganar o ceder electrones (carga eléctrica) con el entorno. En este caso estudiaremos tres procesos: electrización por frotación, contacto e inducción.

Electrización por frotamiento: algunos cuerpos al ser frotados se cargan eléctricamente, por ejemplo, cuando una barra de vidrio se frota con un paño de lana, el vidrio pierde electrones quedando entonces cargado positivamente mientras que el paño de lana queda cargado negativamente porque está ganando

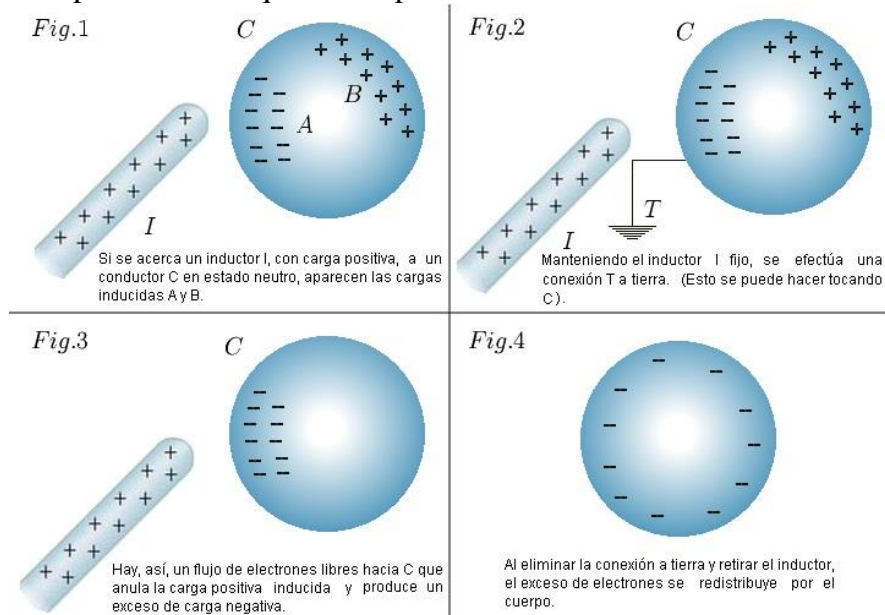


electrones². Esto se debe a que la frotación aumenta la energía cinética de los electrones, debido al aumento de la temperatura (energía interna), logrando facilitar el movimiento de los mismos.

Electrización por contacto: En la electrización por contacto el cuerpo conductor es puesto en contacto con otro cuya carga no es nula. Aquel cuerpo que presente un exceso relativo de electrones los transferirá al otro. Al finalizar la transferencia los dos cuerpos quedan con carga de igual signo³. En el ejemplo, se muestra un cuerpo neutro (cantidad de electrones = cantidad de protones), que cede sus electrones durante el contacto, ya que estos son atraídos por efecto de las interacciones eléctricas que Usted conoció en la enseñanza básica (+ con - se atraen, + con + o - con - se repelen)



Electrización por inducción: Electrización o carga por inducción cuando un cuerpo con carga eléctrica se aproxima a otro neutro causando una redistribución en las cargas (**polarización**) de éste. Para completar el proceso de carga por inducción se debe conectar brevemente el objeto a "tierra" y luego retirar el cuerpo cargado. La inducción transmite carga. La inducción es un proceso de carga de un objeto sin contacto directo.⁴ A continuación se presenta un esquema del proceso de inducción



² Texto original en <http://estandat.blogspot.cl/2012/03/procesos-de-electricacion-por.html>

³ Texto original <https://es.wikipedia.org/wiki/Electrizacion%C3%B3n>

⁴ Texto original https://es.wikipedia.org/wiki/Carga_por_inducci%C3%B3n

⁵ Imagen disponible en <http://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/transfereencia-electronica-metodos-de-electricacion>

Efecto de la carga eléctrica: Fuerza electrostática

La fuerza electrostática, o fuerza eléctrica si se quiere, corresponde a la interacción de atracción o repulsión que se genera entre dos cuerpos cargados. Como es una interacción, se necesita de dos cuerpos. La fuerza eléctrica, desde ahora cuantificada mediante la Ley de Coulomb, posee características importantes ya que corresponde a una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Algunas de las características de esta interacción son las siguientes:

- Es una cantidad vectorial y que tiene unidades de fuerza, que es el [N]
- Solo se produce entre dos cargas. Si existe un sistema de 3 cuerpo cargados, se analizan cada par por separado sobre el cuerpo que se quiera estudiar.
- Depende directamente de la cantidad de carga presente en el cuerpo. Entre mayor sea la carga de los cuerpo, mayor es la interacción. Si uno de ellos tiene carga neutra ($Q=0[C]$) no existe interacción.
- Depende de la distancia de separación (R) entre los cuerpos. A mayor distancia de separación, menor es el valor de su intensidad.
- Para normalizar la ecuación de la ley de coulomb, se hace uso de la constante electrostática $k_e = 9,0 \times 10^9 \left[\frac{Nm^2}{C^2} \right]$, que permite establecer la magnitud de la fuerza

En resumen, la ley de Coulomb, que cuantifica la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas se puede escribir como

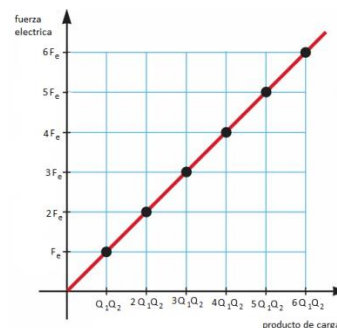
$$|\vec{F}_e| = k_e \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$$

Donde los signos derivados de la operación solo definen si es de atracción (signo -) o de repulsión (signo +).

Comportamiento de F_e respecto a Q y R

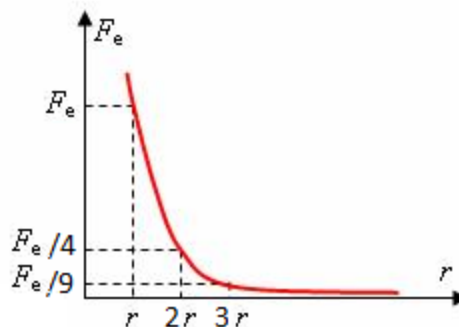
La fuerza eléctrica, debido a su doble dependencia se puede analizar en el comportamiento respecto a la carga eléctrica de los cuerpos que interactúan, como con la distancia de separación de los mismos.

- $F_e \propto Q_1 Q_2$: en este caso, existe una proporcionalidad directa entre las cargas y la fuerza. Esto quiere decir que el aumento del valor de la carga de los cuerpos, incluso uno de ellos que aumente su valor, generará un aumento en la atracción o repulsión entre ellos. Véase que en el caso que el producto de las cargas sea nulo, no existe interacción eléctrica.



- $F_e \propto \frac{1}{R^2}$: en el caso de la dependencia de la distancia, se puede observar que es inversa cuadrática, lo que significa una gráfica curva. En el gráfico, se puede observar que a medida que la distancia aumenta, la fuerza se debilita, pero no de forma lineal. Si la distancia se duplica, la fuerza decae a un cuarto de su valor, si la distancia se triplica, la fuerza decae a un noveno de su valor, si la distancia crece 4 veces, la fuerza decae a 1/16. Analizando los puntos extremos, se puede observar que si la distancia tiende al infinito, aun así la fuerza

eléctrica decae, pero no desaparece por completo. En el caso de que la distancia disminuya su valor hasta valores tendientes a 0[m], la fuerza eléctrica tiende al infinito. Esto presentó una gran duda: ¿si la fuerza eléctrica tiende al infinito cuando $R \rightarrow 0$, como se mantiene el núcleo atómico ligado?. Ahí comienzan a aparecer las teorías de las fuerzas fundamentales, estableciendo la teoría de los gluones, dando origen al estudio de la interacción nuclear fuerte.



Este estudio relacionado con el comportamiento de las fuerzas dio origen al estudio de las fuerzas fundamentales que son 4: la interacción nuclear fuerte, la interacción nuclear débil (relacionada con los decaimientos radiactivos), la fuerza electrostática y la fuerza gravitacional, siendo estas dos las más débiles, pero no las menos importantes. Entre la Ley de Coulomb y la Ley de Gravitación universal de Newton existen varios símiles, ya que establecen más mismas proporcionalidades, de hecho las ecuaciones son

$$F_e = k_e \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$$

$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

Fuerza eléctrica (Coulomb)

Fuerza Gravitacional (Newton)

Antes de seguir...conteste las siguientes preguntas...

Señale a lo menos tres similitudes o diferencias entre la Ley de Coulomb y la Ley de gravitación universal de Newton

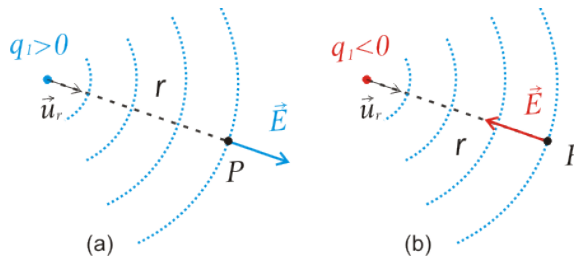
¿Cuál es el valor de la fuerza de repulsión eléctrica entre dos protones separados a una distancia de 5[cm]?

¿A qué distancia deben separarse dos electrones para que el valor de la repulsión eléctrica sea exactamente 10[N]?

El Campo Eléctrico

Al pasar por conceptos tan pequeños como un electrón, la mente humana ha logrado generar descubrimientos asombrosos, solo haciendo uso de la imaginación. Imagine Usted un electrón en el espacio, que se encuentra cerca de otro electrón. Obviamente, existe una repulsión eléctrica. Ahora quite el segundo electrón. El primer electrón ya deja de sentir fuerza, pero, ¿mantiene su capacidad de interactuar con otro cuerpo cargado que ingrese en su espacio?. Esta idea de espacio es lo que en física se denomina campo.

El campo eléctrico corresponde a la modificación del espacio alrededor de un cuerpo con carga eléctrica, al igual que el campo gravitacional generado por un cuerpo con masa. Cualquier cuerpo que ingrese en ese espacio experimentará una interacción eléctrica, ya que su naturaleza eléctrica estaría interactuando con el cuerpo que genera el campo. El campo eléctrico generada por una carga existe incluso sin la presencia de otro cuerpo cargado, ya que esta modificación del espacio nace desde la naturaleza eléctrica (o másica) de los cuerpos.



El campo eléctrico posee varias características, las cuales son señaladas a continuación:

- Es una cantidad vectorial, identificada con la letra \vec{E}
- Posee unidades de $\left[\frac{N}{C}\right]$, es decir, unidades de fuerza por unidades de carga
- Es generado por la carga eléctrica del cuerpo estudiado. Si no hay carga eléctrica, no existe campo eléctrico
- Decae con la distancia, pero nunca llega a desaparecer por completo
- Se compone de líneas de fuerza (próximo tema) radiales salientes o entrantes, según corresponda
- Debido a su naturaleza vectorial, se pueden superponer campos eléctricos (sumar o restar), llegando incluso a entregar una campo eléctrico resultante igual a $0[N/C]$

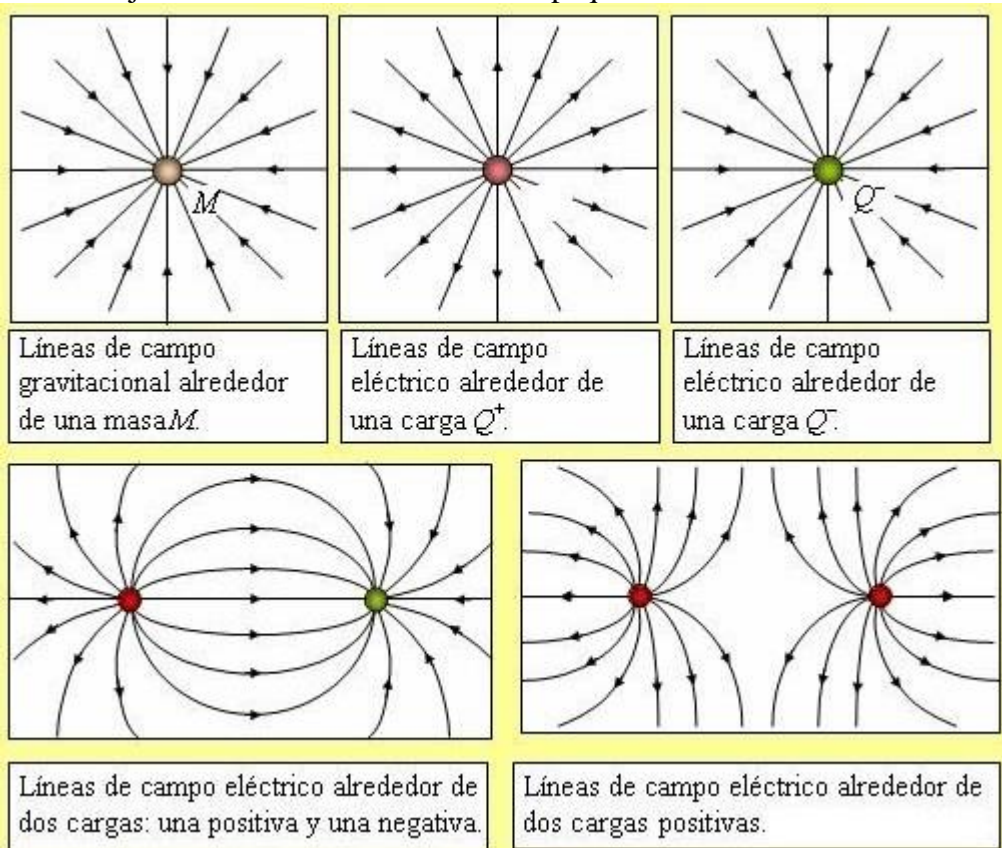
Esta cantidad física, estudiada en la ingeniería y en las ciencias, ha determinado el avance tecnológico de la humanidad, ya que las variaciones de ellas, cuando son periódicas, generan las ondas E-M, tan útiles hoy en día.

Líneas de fuerza

Las líneas de fuerza son modelos geométricos que utilizan flechas para representar campos eléctricos. La distribución de las líneas es de alta importancia, ya que en zonas donde éstas se encuentren más ceñidas unas con otras, el valor del campo o de las interacciones representadas será mayor. En caso contrario, mayor separación de las líneas de fuerza significa disminución de la intensidad de campo o de las interacciones.

En el caso del campo eléctrico, existen dos tipos de representaciones, ya que existen dos tipos de cargas: el campo eléctrico de una carga positiva genera líneas de fuerza radiales y salientes de la carga, en la carga negativa, éstas son radiales y entrantes a la carga. Al graficar la interacción de los campos eléctrico, se puede evidenciar la interacción eléctrica entre las cargas. A continuación, se presenta una imagen que muestra los tipos de

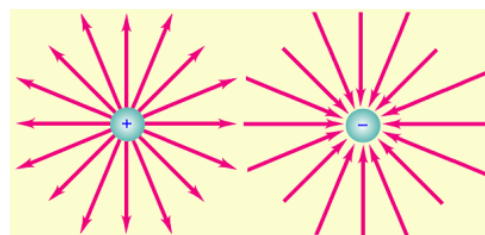
campos y sus interacciones. Se puede observar que cuando las líneas de campo se encuentran mas juntas es cuando R toma valores pequeños.



Tipos de campo eléctrico

Los tipos de cuerpos cargados eléctricamente, pueden generar campos eléctricos de distintas características. Sin embargo, la física ha reducido (con extrema brillantez) los campos eléctricos complejos a una suma vectorial de campos eléctricos simples, los cuales conoceremos a continuación:

- **Campo eléctrico de una carga puntual:** campo generado por una “esfera” cargada o una carga muy pequeña. Este tipo de campo es el mostrado en la figura anterior. La magnitud de este campo es posible calcularla mediante la ecuación $|\vec{E}| = k_e \frac{Q}{R^2}$. Nótese que esta expresión es muy parecida a la ley de Coulomb, pero solo tiene una carga, ya que el campo existe sin que haya interacción eléctrica. Sin embargo, la ley de Coulomb se relaciona directamente con el campo eléctrico, ya que sin campo no existen interacciones. Esto se demuestra mediante la siguiente secuencia matemática:

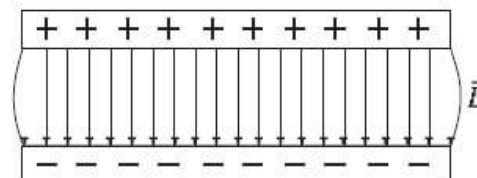


⁶ Imagen disponible <http://elfisicoloco.blogspot.cl/2013/02/lineas-de-campo-electrico.html>

$$F_e = k_e \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \rightarrow F_e = \left(k_e \frac{Q_1}{R^2} \right) Q_2 \rightarrow F_e = E Q_2$$

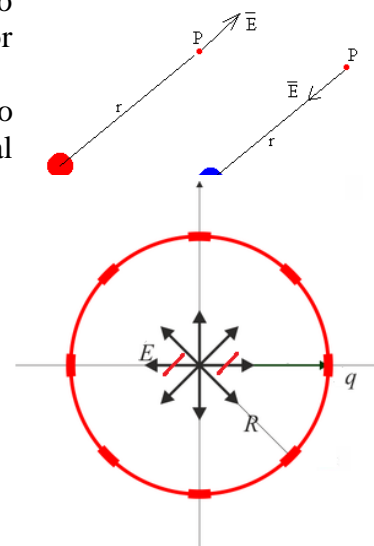
Esto establece que la fuerza eléctrica que experimenta Q_2 es proporcional al campo eléctrico generado por la carga Q_1 . Esto también aplica a la fuerza gravitacional: de hecho la ecuación $P = mg$ es simplemente la masa del cuerpo por el valor del campo gravitacional del planeta, que en la Tierra es $9,8[m/s^2]$. Interesante, no?

- **Campo eléctrico uniforme:** este campo eléctrico es muy utilizado en la actualidad en los acumuladores de carga y energía eléctrica. Consta de dos placas cargadas con cargas eléctricas de signos contrarios, puestas una frente a la otra. Esto genera un campo eléctrico con líneas de fuerza con la misma longitud y separadas a la misma distancia, tal como muestra la figura. Este tipo de campo permite desviar trayectorias de cuerpos con carga eléctrica que pasan por el campo eléctrico, tal como lo hacían las televisiones antiguas o la impresora de inyección de tinta.



- **Campo electrico Neutro o nulo:** caso en el que el campo electrico adquiere un valor de $0[N/C]$. esto se puede dar por dos razones:

- **Carga Neutra:** si el cuerpo que genera el campo posee una carga eléctrica neta igual a $0[C]$ (igual cantidad de protones que de electrones, como por ejemplo un átomo cualquiera), los campos eléctricos positivos se superponen con los negativos, eliminándose entre sí.
- **Casos de simetria:** en el caso de una distribución de carga eléctrica, tal como un cable cargado, se puede dar simetría en estos casos. Esto quiere decir que por cada elemento de carga existe otro en el lado contrario, como en un círculo. Esto hace que el campo eléctrico generado se superponga, anulándose a sí mismo, tal como muestra la figura.



Antes de seguir, de respuesta a las siguientes preguntas...

Investigue acerca de los campos existentes en la naturaleza. Señale algunas similitudes o diferencias entre ellos

¿Cuál es el valor del campo eléctrico generado a una distancia de 5[cm] de él?, ¿a qué distancia se produce un campo eléctrico con una intensidad de $2,304 \times 10^{-8}$ [N/C]?

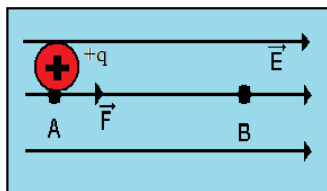
¿Cuál es el valor de una carga que genera un campo eléctrico de $4,5 \times 10^{-5}$ [N/C] a una distancia de 10[cm]?

¿Cuál es el valor de la fuerza eléctrica que experimenta una carga de $-2,5$ [μ C] al ingresar en una zona donde el campo eléctrico posee un valor de 300 [μ N/C]?

Potencial Eléctrico

Uno de los conceptos más complejos de comprender y asimilar el potencial eléctrico. Este concepto, que es un escalar que se mide en [J/C], corresponde a la energía requerida para mover una carga eléctrica que se encuentra dentro de un campo eléctrico, es decir, el trabajo realizado para mover la carga dentro del campo (recuerde que la variación de energía corresponde al trabajo realizado). Debido a que el campo eléctrico interactúa con las cargas eléctricas, cualquier cuerpo cargado que se encuentre dentro de un campo eléctrico experimentará una fuerza eléctrica, la cual hay que contrarrestar para generar un movimiento de la carga. Esa energía utilizada, por unidad de carga, es denominada potencial eléctrico. Nótese que siempre esa energía es gastada para generar el movimiento, de ahí el valor negativo del mismo.

El potencial eléctrico es, generalmente, reconocido con el concepto de voltaje, ya que la unidad [Volt], que es unidad de potencial eléctrico, corresponde a 1[J/C]. Las diferencias de potencial son las responsables de los movimientos de los cuerpos cargados en los campos eléctricos: una carga solo se moverá cuando exista una diferencia de potencial, en caso contrario, no habrá movimiento. Este hecho será estudiado en profundidad en las próximas páginas. El potencial eléctrico, matemáticamente, se puede calcular mediante la ecuación



La diferencia de potencial depende solo de los puntos A y B.

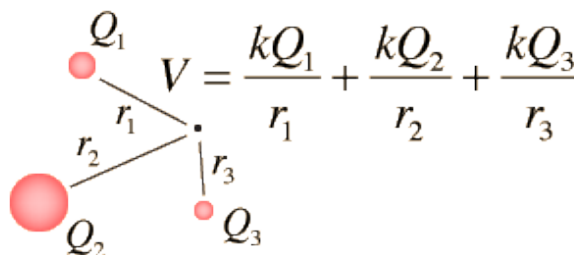
$$\Delta V = V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$$

Donde se observa que la variación de potencial es proporcional al trabajo realizado mover una carga, de valor q , dentro de un campo eléctrico, desde el punto A al punto B. Cabe destacar, que al igual que la aplicación del teorema de la conservación de la energía, solo interesan los puntos de aplicación, y no la trayectoria descrita por la carga eléctrica dentro del campo. Observe que el potencial eléctrico decrece (debido a su signo negativo) cuando el campo aumenta.

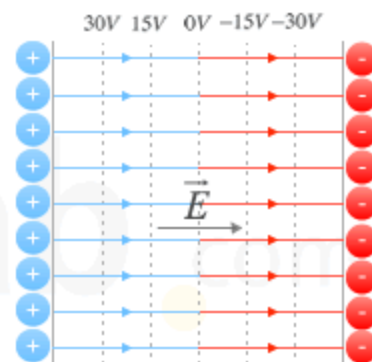
Calculo de potencial eléctrico

La ecuación general para el cálculo del potencial eléctrico, $\Delta V = V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$, solo considera el valor de la carga que se mueve dentro del campo, sin considerar el valor de la carga que genera el campo que es, al fin de cuentas, la que genera la interacción eléctrica. A continuación, se presenta la forma de cálculo del potencial eléctrico en los dos casos más comunes de campo eléctrico: \vec{E} de una carga puntual y \vec{E} uniforme.

- **Potencial eléctrico generado por una carga puntual:** este potencial es generado por una carga puntual que genera un campo eléctrico radial. La ecuación $V = k_e \frac{Q}{R}$ permite calcular el potencial eléctrico generado por una carga a cualquier distancia de ésta. Esta ecuación permite establecer el valor del potencial (cuanta energía se requiere) para colocar cualquier carga en ese punto.



- **Potencial electrico en un campo electrico uniforme:** en este tipo de campo, los valores del potencial electrico solo dependen de la distancia a la cual se quiera determinar el potencial. Dentro de un \vec{E} uniforme, no existen variaciones de intensidad de campo, por lo que la ubicación es la que determina el valor del potencial, tal como lo establece la relacion $V = Ed$. De ahí que el truco de morder las pilas funcione: Usted lo unico que hace es disminuir la distancia de separacion entre las placas, logrando aumnta el potencial entre ellas.

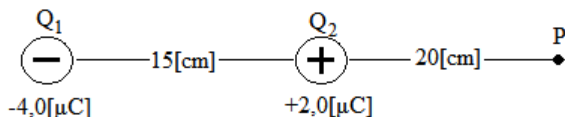


Antes de seguir...responda...

¿Qué significa que el potencial de ionización del átomo de hidrogeno sea $-13,6[eV]$?
Investigue, relacione con lo antes expuesto y explique de la forma más clara posible

¿Cuál es el valor del campo y potencial eléctrico generado por una carga de $+3,0[C]$ a una distancia de $10[cm]$?, ¿y a $50[cm]$?

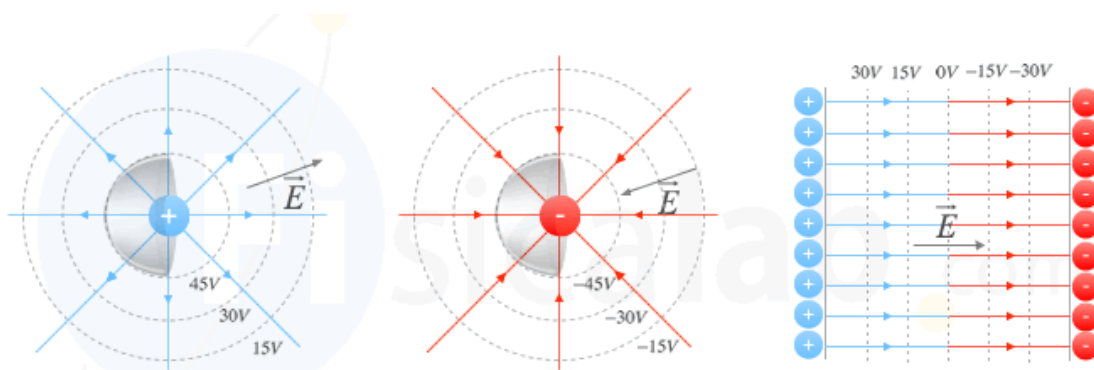
¿Cuál es valor del campo y potencial eléctrico generado en el punto P por las cargas en la siguiente situación?



Superficies equipotenciales

Los valores de los potenciales eléctricos en los campos eléctricos pueden tomar distribuciones que dependen de la forma de la carga y la distancia de separación. En el caso del campo de carga puntual y del campo uniforme, las distribuciones de los potenciales forman distribuciones que pueden considerarse figuras o superficies simétricas, donde las cuales no varia ni la intensidad de campo ni la distancia de aplicación: este es el caso de una superficie equipotencial.

Las superficies equipotenciales son zonas alrededor de una carga donde no existe variación de potencial eléctrico, es decir, no hay cambios de campo ni de distancia. Cualquier carga que se ubique en una superficie equipotencial no sufrirá variaciones de potencial, por lo que no modificará su estado de movimiento. Es decir, que al ubicarse en una superficie equipotencial no hay movimiento de cargas, es decir, no hay corriente eléctrica. En el caso de nuestro sistema de tendido eléctrico e instalaciones eléctrica hogareñas, tenemos dos superficies equipotenciales: el cable “fase” (rojo) que se encuentra a $210[V]$ y el cable neutro (blanco), que está a $0[V]$. Debido a esto es que los pajaritos se pueden posar sobre un solo cable, ya que sobre su cuerpo no existen diferencias de potencial; en caso de que accidentalmente toque el otro, se produce diferencia, generando la descarga (movimiento de cargas). En el caso de nosotros, no podemos darnos ese lujo, ya que si tomamos con nuestras manos el cable fase, nuestros pies están en contacto con la tierra, cuyo potencial es de $0[V]$, lo que genera descarga. De ahí que exista el cable de seguridad llamado “tierra” (verde) que funciona en caso de malfuncionamiento eléctrico, ya que conduce la descarga a la tierra. Apuesto que lo has visto en el patio de tu hogar. A continuación se presentan las superficies equipotenciales de los campos eléctricos más estudiados en este curso.



Las superficies equipotenciales se encuentra señaladas según su valor.

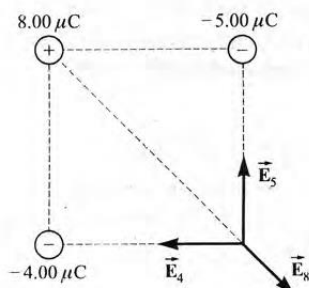
- 1) E de carga puntual --> círculos concéntricos
- 2) E uniforme --> líneas perpendiculares a las líneas de campo

7

Para finalizar, desarrolle los siguientes ejercicios...

Dos monedas reposan sobre una mesa, con una separación de $1,5[m]$ y contienen cargas idénticas, ¿Cuál es el valor de la carga si una de ellas experimenta una fuerza de $20[N]$?

Tres cargas están colocadas sobre tres esquinas de un cuadrado de $30[cm]$ de arista, tal como muestra la figura. Determine el valor del campo resultante. ¿Cuál sería la magnitud de la fuerza que experimentaría una carga de $6[\mu C]$ en ese punto?



¿Cuál es el valor de la diferencia de potencial, en un campo generado por una carga de $2,0[\mu C]$, entre $r_1=10[cm]$ y $r_2=50[cm]$?, ¿Cuánto trabajo se requiere realizar para mover desde $50[cm]$ a $10[cm]$ una carga de $0,05[\mu C]$?

⁷ Imagen disponible <https://www.fisicalab.com/apartado/potencial-electrico-punto>