

INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA

1. Introducción

Enfocaremos nuestra atención en la interacción eléctrica y en la característica asociada a la materia que se conoce como carga eléctrica. El estudio de la electricidad nos va a permitir conocer más adelante las dificultades y logros que ha tenido la transmisión y producción de la corriente eléctrica. Así mismo, la transmisión de información actual es una consecuencia del estudio acerca de la propagación de ondas electromagnéticas.

Hoy día es imposible imaginarnos un mundo sin las innumerables derivaciones que aparecen con el desarrollo de la electricidad, desde la ya lejana luz del alumbrado ordinario hasta las fotocopiadoras u ordenadores actuales, un sinnúmero de aplicaciones de los fenómenos eléctricos han surgido de manera continuada para ofrecernos un mundo más cómodo.



A.1 Menciona algún ejemplo de fenómenos eléctricos y máquinas que se basen en ellos que permitan mostrar el interés que tiene el estudio de este campo.

A.2 ¿Por qué es útil comenzar el estudio de la electricidad a partir del comportamiento de cargas en reposo?

Comentario:

En la actividad A.1, conviene que el profesor "clasifique" las respuestas en dos grandes grupos, de forma que en uno de ellos se contemple el hecho de que, al menos, una de las cargas está en reposo respecto al observador (electrostática) y, en el otro, se incluyan aquellos fenómenos relacionados con el movimiento de las cargas (electrocinética). Esta 'clasificación' permite centrar la atención sobre la electrostática e introducir la siguiente actividad. Al mismo tiempo, se subrayarán los aspectos Ciencia-Técnica-Sociedad (C-T-S) que muestren el interés del estudio a realizar, en particular, la producción de energía eléctrica y su transporte a grandes distancias, los problemas de grandes pérdidas de energía que ello conlleva, la búsqueda de nuevos materiales superconductores etc., así como la rapidez en las transmisiones de información mediante cables y ondas.



En la actividad A.2 se pretende que los estudiantes lleguen a intuir el interés de ocuparse de cargas en reposo debido a que su comportamiento físico es más simple que el de cargas en movimiento. Esto puede ser una buena ocasión para referirse a cómo los científicos comienzan planteándose situaciones elementales (incluso artificialmente simplificadas) que les resultan asequibles y les permiten abordar el problema. De hecho, cuando los científicos se plantearon situaciones

simplificadas de cargas en reposo empezaron a lograrse los primeros avances en la teoría eléctrica, y lo mismo cabe esperar en los estudiantes.



A.3 Haz un breve resumen acerca de la naturaleza y carácter de las fuerzas eléctricas.



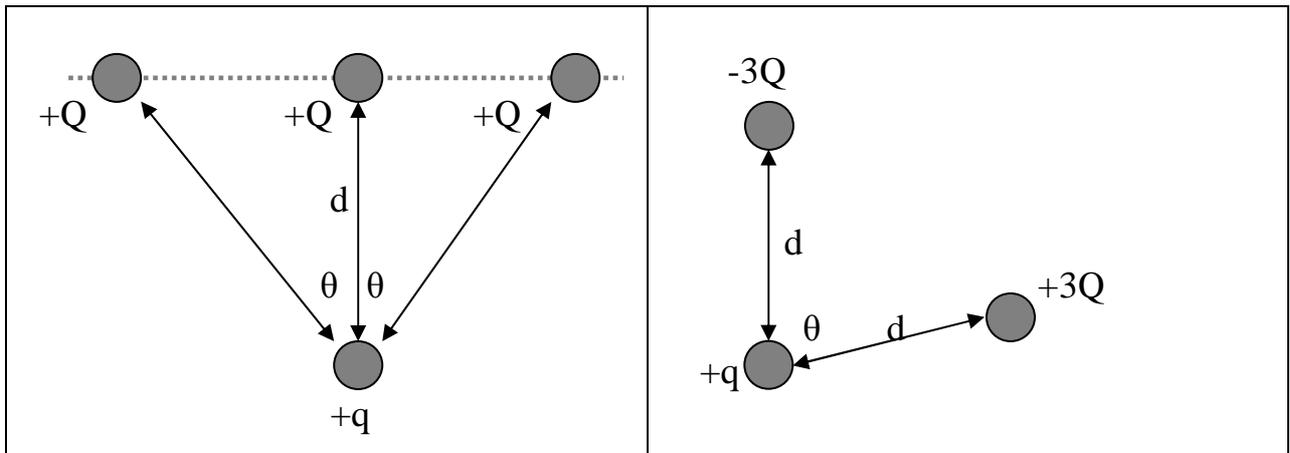
A.4 Tenemos dos cargas puntuales $+q$ y $+Q$ (siendo $Q > q$) situadas a una distancia d entre sí tal y como indica la figura.

a) Dibujar la fuerza eléctrica ejercida sobre cada carga por la otra

b) ¿La fuerza que actúa sobre $+q$ es mayor, igual o menor que la fuerza que actúa sobre $+Q$? Explicar la respuesta.

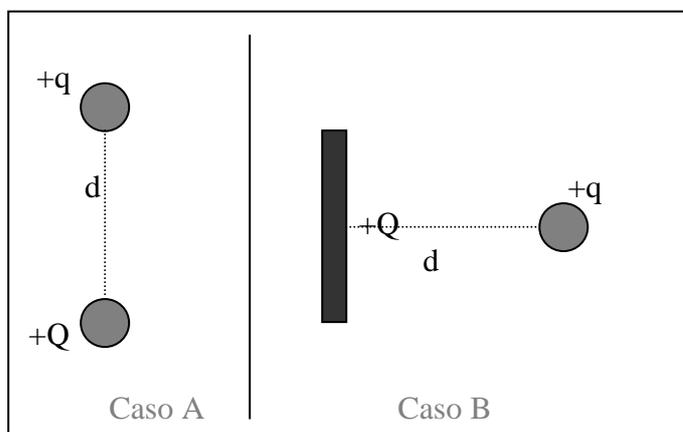


A.5 Calcular el valor de la fuerza resultante que actúa sobre la carga $+q$ en cada uno de los siguientes casos. Explicar cómo la calculas.



A.6 En el Caso A de la figura, una carga puntual $+q$ se encuentra a una distancia d de otra cargada con una carga $+Q$.

En el Caso B de la figura, la carga puntual $+q$ se encuentra a una distancia d del centro de una varilla de plástico que se encuentra cargada con una carga total $+Q$.



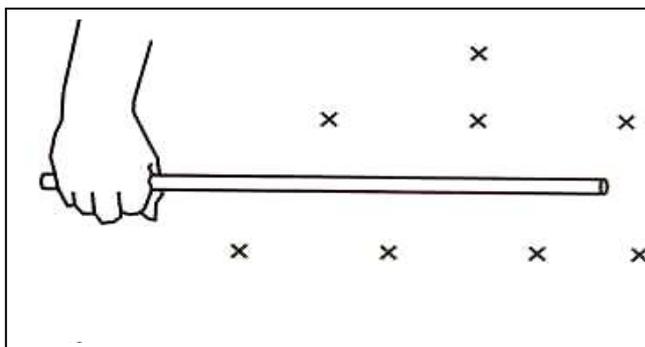
Lee la siguiente explicación de un estudiante: “La carga puntual y la varilla tienen la misma carga $+Q$, por tanto la fuerza que ejercen sobre la carga $+q$ es la misma”.

Analiza con tus compañeros el razonamiento del estudiante, y en caso de que lo encuentres incorrecto, explica la respuesta que, a tu juicio, sería la correcta.

A.7 Una barra de plástico está cargada positivamente en la mitad izquierda y negativamente en la mitad derecha (ver figura), siendo su carga total cero. Se coloca la barra cerca de una carga puntual $+q$, ¿actuará una fuerza sobre la carga $+q$? Explicar la respuesta.



A.8 Se ha frotado la punta de una barra de plástico como la de la figura, cargándola positivamente. Indica si actuará fuerza sobre una carga puntual $+q$ que se sitúa en cada uno de los puntos de la figura. Dibuja la fuerza y explica tu respuesta.



Comentario:

En la A.3 los estudiantes suelen mencionar alguna característica de las que a continuación presentamos. El profesor tratará en una puesta en común de llegar a analizar el conjunto de todas ellas, a saber:

- La fuerza eléctrica es similar a la gravitatoria, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, pero mucho más intensa.
- En este caso hay fuerzas eléctricas atractivas y repulsivas. Esto supone que hay dos tipos de electricidad: positiva y negativa.
- La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales, o que se comportan como tal, se caracteriza porque:
 - Es proporcional a la cantidad de carga.
 - Es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.
 - Su dirección es la de la línea que une ambas cargas.
 - El valor de la fuerza viene dada por ley de Coulomb



En ocasiones es necesario recordar a los estudiantes que:

- La ley de Coulomb es válida para la interacción entre dos cargas puntuales, o como se ha dicho anteriormente, se comporten como tal.



Cuando hay más cargas puntuales se aplica el Principio de superposición.

- La carga está cuantizada.
- Conservación de la carga.

El conjunto de las actividades que planteamos a continuación (A.4-A.8) tienen como objetivo proponer a los estudiantes el análisis de fenómenos electrostáticos y problemas que les son familiares de otros cursos. Durante el proceso de resolución es probable que los estudiantes utilicen conceptos y procedimientos erróneos que servirán para que el profesor tenga la posibilidad de reformularlos y corregirlos, así como propiciar una reflexión sobre su propio conocimiento. Entre las ideas alternativas más frecuentes utilizadas por los estudiantes y mencionadas por la bibliografía, podemos encontrar las siguientes:

- Aplicación incorrecta de la ley de acción y reacción en el ámbito de la electricidad.
- Manejo del cálculo vectorial.
- Limitaciones del rango de aplicabilidad de la ley de Coulomb.
- Los cuerpos neutros no ejercen fuerza eléctrica alguna sobre cargas eléctricas.
- Cuerpos de material aislante no ejercen, en ninguna circunstancia, fuerzas eléctricas con cuerpos cargados.



En A.4 muchos estudiantes ante esta situación, y aunque conocen memorísticamente la ley de acción y reacción, aplicada por su parte muchas veces en Mecánica, suelen dibujar sobre cada carga fuerzas distintas, (normalmente más grande sobre la pequeña, pues afirman que cuanto más grande sea la carga más fuerza ejercerá sobre la otra), demostrando así un conocimiento no comprensivo de la ley aludida.

En A.5 se trata de hacer un recordatorio, en lo que se refiere al cálculo vectorial, inherente a la aplicación del Principio de Superposición que hay que aplicar en numerosas ocasiones en este contexto de análisis sobre la interacción electrostática.

Los estudiantes, con mucha frecuencia y en todos los ámbitos de la Física, atribuyen a las leyes que estudian (de forma acrítica) unas características universales de aplicabilidad que casi nunca tienen; este es el caso de la ley de Coulomb que sólo es aplicable si los cuerpos que interactúan son puntuales o se comportan como tal. En definitiva, los estudiantes tienen que trabajar actividades como la A.6, desde el comienzo del curso, en las que se pone de manifiesto las limitaciones sobre la validez de leyes y conceptos que se utilicen para analizar cualquier situación física.

La idea previa de que un cuerpo neutro, como es el caso de la barra de A.7, no ejercerá, en cualquier circunstancia, fuerza eléctrica alguna sobre otra carga, está muy arraigada entre los estudiantes, consecuencia de una aplicación incorrecta de la ley de Coulomb. Así pues, es objetivo de esta actividad, juntamente con otras, el aprendizaje comprensivo de dicha ley.

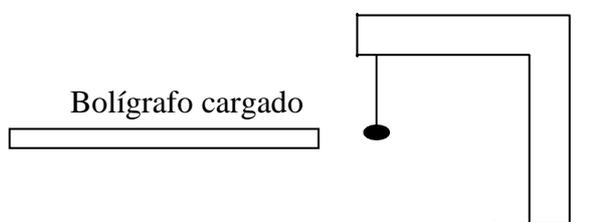


Una idea muy extendida entre los estudiantes, como lo demuestran diferentes estudios al respecto, es que un material aislante no actúa eléctricamente con cuerpos cargados. Eso no tiene por qué ser así; de hecho en A.8 se plantea una situación en la que eso no sucede. Además, se podría aprovechar para plantear a los estudiantes dónde hay carga en la barra (carga de materiales dieléctricos) y que sirviera para conocer las ideas previas de los estudiantes en lo referente a la forma en la que se cargan los cuerpos, aspecto que se aborda más adelante.

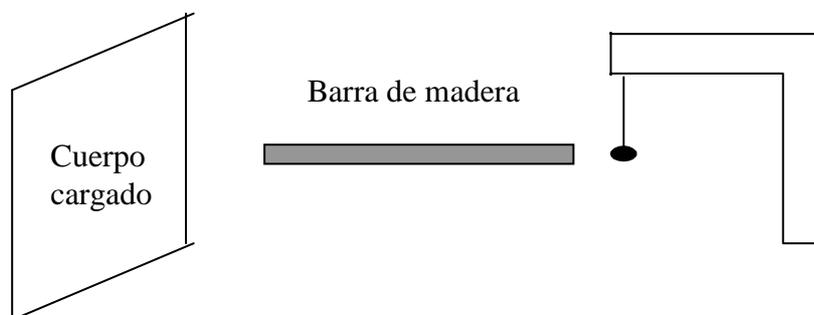
3. ¿Cómo se explican algunos fenómenos electrostáticos?



A.9 Cuando se acerca un bolígrafo cargado a otro cuerpo neutro, (ver figura), experimentalmente se comprueba que el cuerpo neutro es atraído por el bolígrafo. Explica por qué sucede.



A.10 Consideremos el sistema de la figura ¿se moverá el péndulo?



A.11 Una varilla de plástico frotada con un trapo de lana se electrifica. ¿Qué ocurriría si la varilla fuera metálica?

Comentario:

El fenómeno de la A.9 se debe a la inducción eléctrica que produce la varilla cargada sobre el cuerpo neutro (sin necesidad de contacto, mediante una acción a distancia). Los estudiantes no suelen realizar una secuencia de razonamiento como la siguiente: a) separación de cargas que se produce en el cuerpo neutro (polarización del cuerpo) y, por tanto, b) la aparición de fuerzas eléctricas entre ambos cuerpos.

El razonamiento sobre A.10 es parecido al anterior y con los mismos resultados, pero más complejo. La naturaleza no conductora de la barra de madera, no impide la influencia (inducción) que se ejerce sobre el péndulo por parte del cuerpo cargado y de la propia barra de madera polarizada. La gran mayoría de los estudiantes de primer curso no suelen realizar un razonamiento correcto y presentan dificultades en estas cuestiones, por lo que conviene analizar las situaciones con detenimiento y no como algo ya sabido.



El objetivo de A.11 es realizar el análisis de la electrización por frotamiento. Como consecuencia se introduce la serie triboeléctrica para, de esa manera, ahondar en la estructura eléctrica de la materia y saber cómo se electrizan entre si dos cuerpos por frotamiento.

En lo que se refiere a la pregunta propiamente dicha, la mano que sostiene la varilla metálica actúa como puente entre el metal y la tierra, perdiendo por tanto la carga eléctrica que adquiere por frotamiento. Este análisis permitirá plantear a los estudiantes cuestiones relacionadas con el aspecto energético del estudio de la electricidad (en particular, la toma de tierra) que más adelante se deberá abordar.

SERIE TRIBOELECTRICA

Metales	
Piel de conejo	dadores de electrones, se carga +
Vidrio	
Nylon	
Lana	
Piel de gato	
Seda	
Papel	
Algodón	
Resina acrílica	
Poliestireno	
Polietileno	
Globo de goma	
Azufre	captadores de electrones, se carga -



4. ¿Dónde se ubican las cargas en los cuerpos?

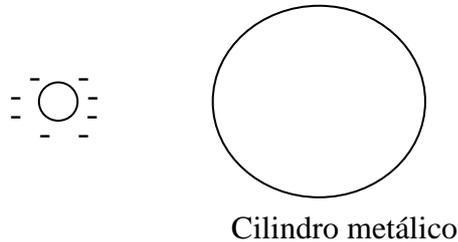


A.12 Una varilla de material dieléctrico tiene una carga de $8\mu\text{C}$. Dibuja su distribución de carga.



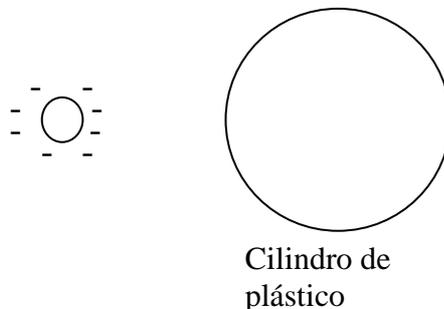
A.13 Una varilla metálica tiene una carga de $8\mu\text{C}$. Dibuja su distribución de carga.

A.14 Una barra de plástico cargada negativamente, se acerca a un cilindro metálico neutro. Explica cómo será la distribución de carga en el cilindro y dibuja el vector fuerza neta que actúa sobre él.



A.15 Una barra de plástico cargada negativamente, se acerca a un cilindro de plástico neutro. Explica cómo será la distribución de carga en el cilindro y dibuja el vector fuerza neta que actúa sobre él.

Compara la fuerza neta sobre el cilindro en ambos casos.



A.16 Haz un resumen que mencione las características principales vistas hasta ahora, acerca del comportamiento eléctrico de la materia.

Sugerencias: deberá responder a preguntas tales como: ¿cuál es la propiedad de la materia analizada?, ¿qué tipos de fuerza se ejercen?, ¿cuál es la ley que rige las interacciones y bajo qué circunstancias se aplica?, ¿cómo se comportan los cuerpos neutros ante la propiedad eléctrica?...

Comentario:

En la A.12 la distribución de carga será mayor allá donde se genere el contacto entre el cuerpo que carga y el cuerpo que se carga.

En A.13 los alumnos posiblemente dibujarán una distribución uniforme de carga (lo que de momento es suficiente, debido a su repulsión). Sin embargo más adelante, cuando se vea el ‘efecto punta’ volveremos a esta actividad para dar un modelo más satisfactorio, acerca de la distribución de carga en los cuerpos de acuerdo con su forma.



El objetivo de A.14 es revisar la polarización de los materiales conductores en función de las condiciones de simetría, así como introducir el concepto de fuerza sobre cuerpos extensos.

El objetivo de A.15, igual que la actividad anterior; en este caso para materiales dieléctricos.

Este tipo de actividades, como la A.16, las abordaremos a lo largo de todo el currículum cuando convenga resumir de una forma global el conjunto de conocimientos aprendidos, teniendo todos ellos una serie de características comunes; en concreto, en este caso, después de una puesta en común con los estudiantes, el resumen puede ser un esquema como el que presentamos a continuación:

MODELO ELÉCTRICO DE LA MATERIA

Las características principales del comportamiento eléctrico de la materia que deben conocer y aplicar los estudiantes son las siguientes:

- 1) La propiedad eléctrica de la materia se representa por la magnitud denominada carga.
- 2) En la materia existen dos tipos de carga, positiva y negativa. Los cuerpos quedan cargados cuando existen cantidades de carga distintas de ambos tipos.
- 3) Entre cargas del mismo tipo se producen fuerzas de repulsión, y entre cargas de distinto tipo fuerzas de atracción; ocurriendo lo mismo entre cuerpos cargados.
- 4) Las fuerzas eléctricas disminuyen con la distancia entre cargas. La fuerza entre dos cargas eléctricas puntuales, o que se comporten como tal, (siendo al menos una de ellas estacionaria), cumple la ley de Coulomb.
- 5) Muchos materiales al frotarlos con otros se electrifican, es decir se cargan: se produce intercambio de cargas entre los cuerpos, quedando uno de ellos con defecto y el otro con exceso de cargas, es decir, cargados positivamente y negativamente.
- 6) Cuando un cuerpo cargado se acerca a otro neutro, como consecuencia de la fuerza eléctrica que el cuerpo cargado ejerce sobre las cargas del neutro, en éste último las cargas se separan, acercándose más las cargas de tipo opuesto a las del cuerpo cargado. Por consiguiente, las fuerzas de carácter atractivo aumentan, disminuyendo las repulsivas y en suma haciendo que los dos cuerpos se atraigan. A este fenómeno se le denomina inducción, y a lo que le ocurre al cuerpo neutro, polarización.
- 7) Muchos materiales se electrifican por contacto. Cuando el cuerpo neutro toca al cuerpo cargado, se transfiere carga entre ellos. Ambos quedan cargados por el mismo tipo de carga y por tanto se repelen.



En este punto de reflexión conviene también analizar la clasificación que se suele hacer de los materiales en conductores y dieléctricos, y ver que la separación no es tan radical sino que más bien se trata de una escala que muchas veces depende de las condiciones para que sea conductor o no. Se puede poner el ejemplo del aire. Sin embargo, sí es necesario que los estudiantes sepan distinguir el diferente comportamiento de los conductores y dieléctricos ante la interacción

eléctrica. Se les estimulará a que hagan un resumen de este comportamiento y lleguen a un esquema similar al que ponemos a continuación:

Los Materiales y la Electricidad en los fenómenos triboeléctricos

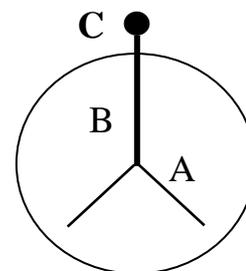
Conductores	Dielectricos
Sólo se cargan por frotamiento en el caso de que estén aislados.	Se cargan mediante frotamiento.
Cuando se encuentran en estado neutro y en presencia de otro cuerpo cargado resultan polarizados; los electrones se mueven en su interior.	Cuando se encuentran en estado neutro y en presencia de otro cuerpo cargado resultan polarizados, reorientándose las moléculas en su interior.
Cuando se encuentran cargados en situación de equilibrio, las cargas se distribuyen en la superficie.	Cuando están cargados las cargas pueden estar ubicadas en cualquier zona.

5. ¿Cómo se abordan las situaciones problemáticas globales en el ámbito de los fenómenos eléctricos?

Otra actividad que desarrollaremos a lo largo del curso es la resolución de problemas globales que suponen un esfuerzo mayor que la resolución de cuestiones, de problemas concretos referidos a un apartado o de problemas estándar con datos numéricos. En este tipo de problemas nos serán de utilidad habilidades y procedimientos que utilizan los científicos como plantear el problema, emitir hipótesis, analizar diferentes estrategias de resolución, encontrar resultados y evaluarlos, etc. El profesor los irá señalando en cada problema concreto y tendrás ocasión de comprobar que estos procedimientos son una valiosa ayuda para analizar y resolver problemas.



A.17 El electroscopio es un dispositivo que sirve para la detección de la carga eléctrica. Dos láminas delgadas de aluminio A están unidas al extremo de una varilla metálica B, que posee una esfera metálica C en su parte superior, quedando todo ello aislado de la estructura del aparato. Cuando se toca la bola C del electroscopio con un cuerpo cargado, las hojas A se repelen y su separación es una medida de la carga que han adquirido. a) Explica el proceso lo más detalladamente que puedas. b) ¿Por qué se precisa en el enunciado que las láminas A son delgadas y que la parte metálica se encuentra aislada? c) ¿Se



podría aplicar la ley de Coulomb para valorar la fuerza eléctrica entre las láminas? Razónalo.

Comentario:

Se trata de trabajar la metodología de resolución de problemas como investigación orientada (ver introducción general) en un contexto sencillo y, seguramente, familiar para los estudiantes con una cierta componente CTS (el electroscopio).

El estudio de la situación problemática se divide en tres actividades (A.17, A.18 y A.19). La primera actividad (A.17) aborda el análisis cualitativo de la situación centrándose en las precisiones aportadas por el enunciado y en el rango de aplicabilidad de la ley de Coulomb, así como en la posible evolución del sistema de cargas. Este análisis tiene su continuación en la siguiente actividad (A.18).

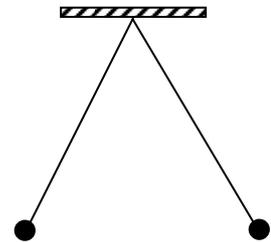


Actividades a realizar con los estudiantes en la resolución:

- a) Cuando se toca la bola metálica del electroscopio con un cuerpo cargado, las hojas de éste adquieren por contacto cargas del mismo signo y se repelen. La fuerza de repulsión electrostática se equilibra con el peso cuando se ha producido una determinada desviación θ .
- b) Si las láminas no fueran delgadas su peso sería mayor y la repulsión electrostática produciría desviaciones menores. Por otro lado, si la parte metálica del dispositivo no estuviera eléctricamente aislada, la carga se dispersaría y no se ubicaría sólo en la varilla metálica y en las láminas.
- c) La ley de Coulomb únicamente es aplicable para expresar la interacción eléctrica entre cargas puntuales o cuerpos continuos cargados que por su simetría, o porque sus dimensiones son mucho más pequeñas que la distancia que los separa, se comporten como si fueran cargas puntuales. Éste, sin embargo, no es el caso de las varillas cargadas.



A.18 Un modelo simplificado de electroscopio consiste en dos pequeñas esferas metálicas cargadas que cuelgan de dos hilos aislantes de masa despreciable cuyo extremo se fija a un techo. a) ¿Se podría aplicar la ley de Coulomb para valorar la fuerza eléctrica entre las cargas? Razónalo. b) Dibuja en un esquema todas las interacciones sobre el sistema en el equilibrio. Explica su procedencia. c) ¿De qué factores dependerá la desviación entre los hilos? Razona las relaciones entre variables que consideres más importantes. d) Obtén la expresión matemática que relaciona el ángulo de desviación con esas magnitudes. e) ¿Es dimensionalmente homogéneo el resultado? f) Contrasta las hipótesis de



variables del apartado c) con el resultado matemático. g) Si las cargas de las dos esferas no fueran iguales, pero sus masas y la longitud de los hilos sí lo fueran, ¿se desviarían las dos lo mismo respecto de la vertical? Razónalo.

Comentario:

En esta actividad, continuación de la anterior, se propone una modelización simplificada de la situación, la cual sí permite abordar la resolución en base a la ley de Coulomb. Se incide, también, en las interacciones sobre las distintas partes del sistema y su procedencia.



Posteriormente se aborda, por primera vez en el curso, la emisión de hipótesis sobre la dependencia de variables. Nos centramos, fundamentalmente, en la relación $\theta = \theta(q, m)$ y dejamos de lado la longitud del hilo y la permitividad del medio (por simplificar).

Una vez alcanzado un resultado matemático, éste se analizaría en base a las hipótesis, a la coherencia dimensional así como por medio del programa de simulación cuyas características se resumen en la siguiente actividad (A.19).



Finalmente, y como nueva perspectiva, se plantea la cuestión de si las dos cargas no fueran iguales entre sí, se produciría una desviación asimétrica, lo cual podría poner en evidencia déficits asociados al principio de acción y reacción.

Actividades a realizar con los estudiantes en la resolución:

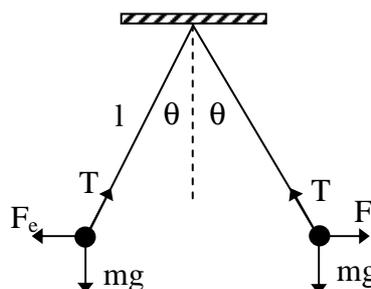
a) La interacción electrostática entre las cargas puntuales del modelo simplificado de electroscopio sí pueden ser expresadas por medio de la ley de Coulomb.

b) Sobre cada una de las cargas se producen las siguientes interacciones:

La tensión T producida por la cuerda.

El peso mg consecuencia de la interacción gravitatoria con la tierra.

La fuerza de repulsión eléctrica F_e entre las cargas del mismo signo.



c) Como consecuencia de estas interacciones

sobre cada carga, una vez alcanzado el equilibrio entre las fuerzas, cada uno de los hilos se habrá desviado un mismo ángulo θ respecto de la vertical. Se puede comprender de manera intuitiva que cuanto mayor se la carga q , mayor será la fuerza de repulsión eléctrica y mayor el desplazamiento angular θ . En cambio, si aumentáramos el peso mg de las bolitas, éstas opondrían mayor resistencia a ser desplazadas, por lo que a mayor m y mayor g , (si realizáramos la experiencia en distintos lugares podríamos variar g), menor θ .

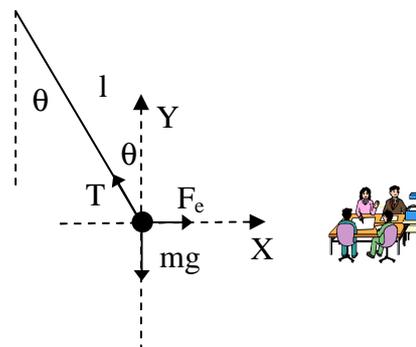
Aunque el desplazamiento angular en el equilibrio depende también de la permitividad del medio y de la longitud del hilo, no abordamos estas relaciones, menos intuitivas, en el contexto de este problema.

Así, establecemos como hipótesis que en el equilibrio $\theta = \theta(q, m, g)$.

d) Aplicando la segunda ley de Newton en el equilibrio a una de las esferas de acuerdo con el sistema de referencia señalado en la figura:

$$\text{OX: } F_e - T \sin \theta = 0 \quad (1)$$

$$\text{OY: } T \cos \theta - mg = 0 \quad (2)$$



Dividiendo (1)/(2) se tiene, $\text{tg} \theta = F_e / mg$, y como $F_e = K \frac{q \cdot q}{(2l \sin \theta)^2}$, despejando

queda:

$$\frac{\sin^3 \theta}{\cos \theta} = \frac{Kq^2}{mgl^2}$$

e) Con objeto de analizar la homogeneidad dimensional de la expresión matemática obtenida, comprobamos si el segundo miembro de la igualdad queda adimensional, al igual que el primero en el que sólo interviene el ángulo y por tanto no tiene dimensiones.

$$\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^2}{\text{C}^2 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2} \equiv 1$$

f) La fuerza de repulsión eléctrica entre las cargas q y Q sería $F_e = K \frac{q \cdot Q}{(2l \sin \theta)^2}$.

Esta fuerza representa la interacción entre las dos cargas y es la misma sobre ambas. Si no cambiamos ni m ni l , la desviación θ tendrá que ser la misma para las dos.

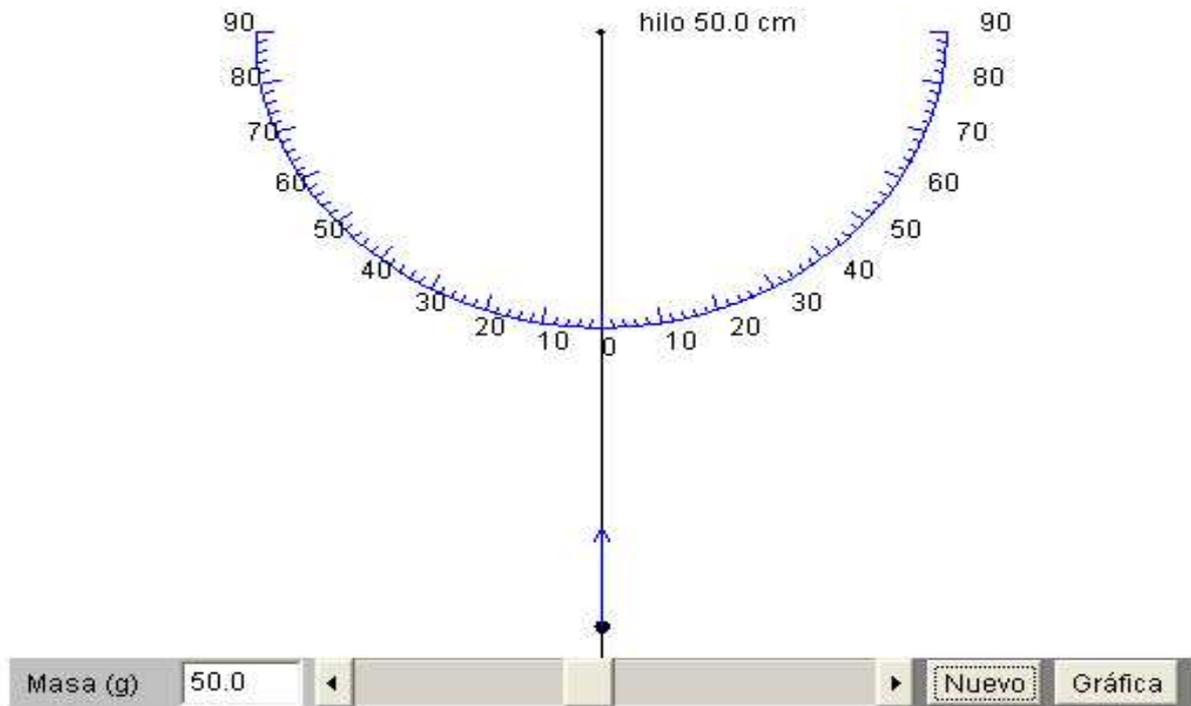


A.19 El fislet ‘Péndulos cargados’ del CD adjunto, permite visualizar la separación entre los hilos. El simulador genera aleatoriamente una carga q medida en μC cada vez que se pulsa el botón Nuevo. El valor de la masa m , expresada en gramos, se introduce en el control de edición Masa. La longitud del hilo está fijada en $l = 50 \text{ cm}$.

a) ¿Qué tipo de relación hay entre la carga q y el ángulo de separación θ ?

Trata de contrastar con la simulación la validez de los resultados de la A. 18

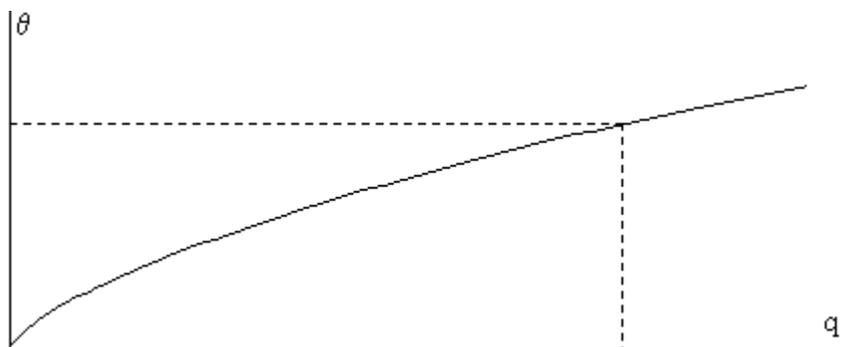
b) ¿Si duplicamos la masa de la bolita se obtendrá doble ángulo θ ?



Comentario:

El programa nos permite analizar la gráfica θ/q para unos valores prefijados de m y l . Esto permite comprobar que, tal y como habíamos previsto, a mayor q mayor θ . Esta relación, sin embargo, no es lineal y, por ello, el gráfico correspondiente no se ajusta a una recta.

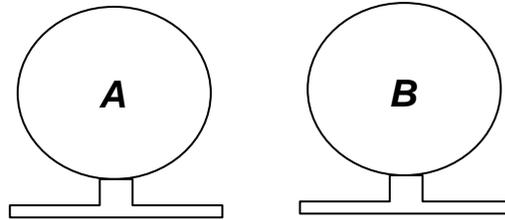
Así mismo, si variamos la masa m a un valor mayor, por ejemplo, podremos observar en el nuevo gráfico θ/q que para un valor determinado de q la desviación correspondiente al equilibrio es menor. Podremos centrarnos, por ejemplo, en una masa doble y comprobar que la desviación obtenida, aunque menor, no es la mitad. Es decir, m y θ no se relacionan linealmente.



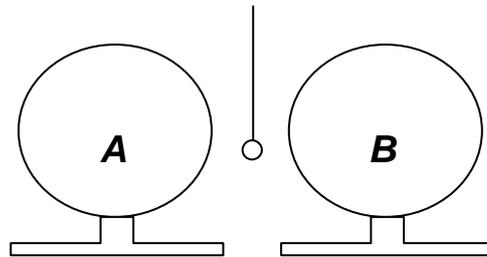


A.20 Una esfera metálica A se carga negativamente y se coloca cerca de otra esfera B descargada. Ambas esferas son iguales y se encuentran sobre una superficie aislante. La humedad ambiental es muy pequeña.

- a) Utiliza símbolos “+” y “-” para representar la distribución de carga en cada esfera.



- b) Se suspende entre las dos esferas una esferita metálica inicialmente descargada. La esferita empieza a oscilar, apreciándose que comienza a golpear contra la esfera A y después, de manera alternativa, contra ambas.



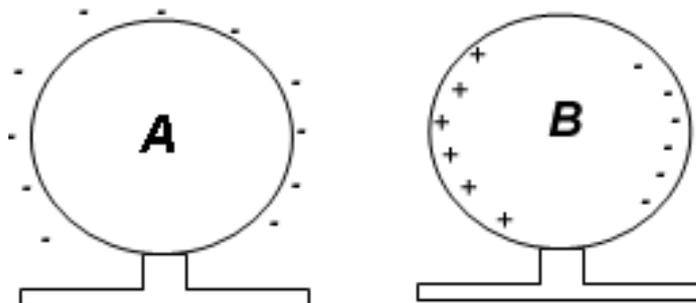
Justifica el comienzo de las oscilaciones y el trasvase de cargas por contacto entre las esferas y la esferita.

- c) Se observa al cabo de unos pocos segundos que la esferita deja de oscilar, deteniéndose. ¿Cuándo sucede? Utiliza dibujos para tus explicaciones.

Comentario:

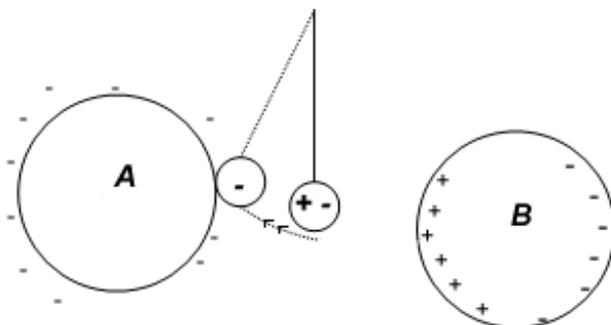
El objetivo de esta actividad es el de revisar, reflexionar y profundizar acerca de la distribución de carga, fenómenos de inducción y electrización por contacto. Puede utilizarse también como actividad de evaluación del aprendizaje logrado por los estudiantes en la lección y como actividad de feedback.

Una posible guía de trabajo con los estudiantes es la que sigue:

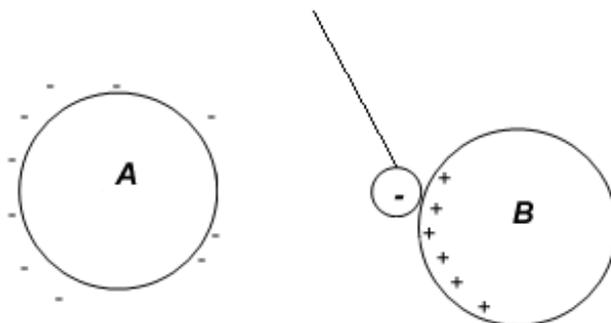


El apartado a) se trata de un fenómeno de inducción. En la esfera B se redistribuye la carga y queda polarizada .

b.1)



b.2)



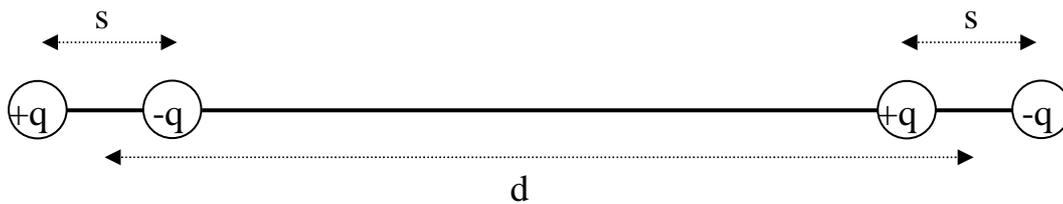
La esferita es atraída por la esfera con mayor cantidad de carga. A ello contribuye que ella misma también se polariza. Al contacto con A se lleva una cierta carga $-$ (que descarga un poco A), causa principal de su atracción por B.

Allí, durante el contacto, cede parte de la carga negativa que lleva a la esfera B, cargando a ésta con una carga negativa y entonces B la repele. El proceso continúa hasta que la carga en ambas esfera se iguala. En ese instante el péndulo quedará en equilibrio.

En otro orden de cosas hay que decir que la cantidad de carga que pasa de cada esfera al péndulo, cada vez que se tocan, no se puede concretar todavía, y es una situación que queda abierta y que se resolverá de forma fácil y adecuada cuando se conozca el concepto energético de potencial eléctrico.



A.21 Dos dipolos iguales están formados por cargas $+q$ y $-q$ separadas una distancia s , de tal forma que la distancia entre dipolos es d ($d \gg s$) tal y como se muestra en la figura:



- a) Dibujar los vectores que representan la fuerza neta sobre cada dipolo.
 b) Conocido que la fuerza que cada dipolo ejerce sobre el otro viene dada por:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{6 q^2 s^2}{d^4}$$

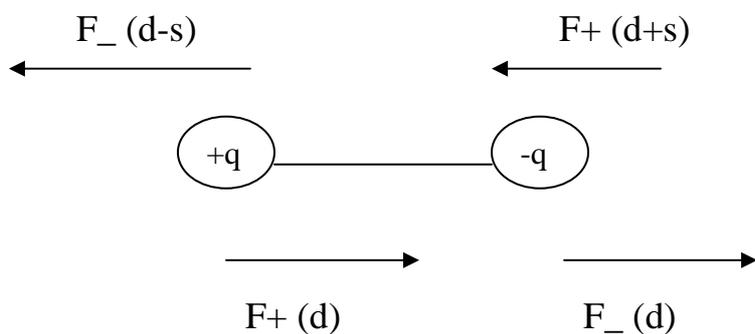
¿Cómo se conjuga este resultado con la ley de Coulomb en que las fuerzas eléctricas son proporcionales a $1/d^2$? Efectúa una comprobación dimensional de dicha fórmula

Comentario:

Algunas de las habilidades científicas que se pueden practicar con los estudiantes son:

- i) Aplicación de la ley de Coulomb para cargas puntuales

Las fuerzas ejercidas sobre cada dipolo de la derecha, son:



Donde aparecen entre paréntesis las distancias respectivas.

De manera análoga para el dipolo de la izquierda.

- ii) Analizar el grado de validez de la ley de Coulomb

La ley de Coulomb únicamente es válida para la interacción entre dos cargas puntuales, o que se comporten como tal, estando en reposo al menos una de ellas. Por tanto, la fuerza neta, debe calcularse por superposición de las fuerzas en la interacción entre dos cargas puntuales y, en consecuencia, el resultado no tiene por qué depender exactamente con el inverso del cuadrado de la distancia.

- iii) Proponer análisis de resultados. Valorando algún caso límite de fácil comprensión y, además, efectuando una comprobación dimensional del resultado.



Por otro lado, en lo que se refiere al análisis dimensional se observa que:

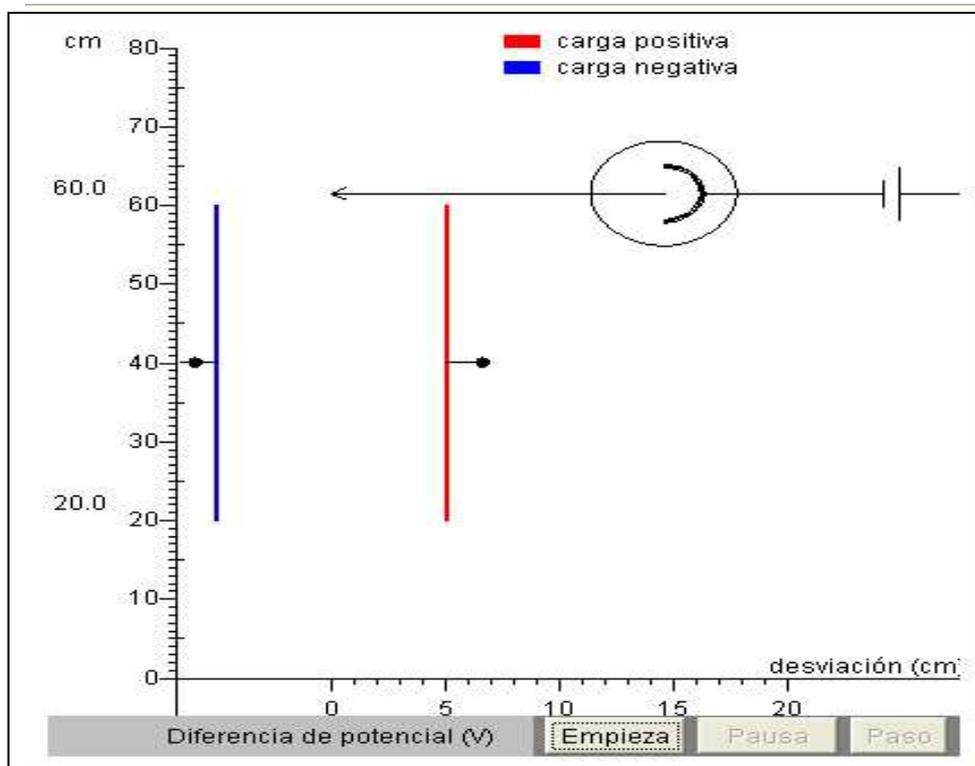
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{6q^2}{d^4}$$

\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
 N $N \cdot m^2 / c^2$ c^2 m^2 / m^4

Por lo tanto la expresión es dimensionalmente homogénea.



A.22 Las semillas normales se pueden separar de las impurezas y de otros objetos extraños empleando un selector de semillas electrostático con el que, por ejemplo, se seleccionan guisantes a una velocidad de 100 por segundo, o sea, dos toneladas por día.



Con un par de fotocélulas se detecta el color de las semillas al caer una a una por un tubo. Si el color no es el correspondiente a la semilla que se quiere seleccionar, se aplica un potencial a una punta que, al pasar la semilla frente a ella, le proporciona una carga. Aprovechando esta circunstancia ¿cómo completarías el diseño del dispositivo para recoger las semillas seleccionadas? Explica, lo más detalladamente que puedas, cualitativamente (sin utilizar fórmulas) cada una de las fases del proceso. Vete al fislet ‘Separación de semillas’ y visualízalo.

Comentario:

Se trata de una actividad con una clara predominante CTS y que aglutina algunos conceptos importantes sobre la interacción electrostática: efecto punta, descarga disruptiva y fuerza eléctrica (y gravitatoria) sobre una partícula cargada en el interior de un campo eléctrico. Puesto que la resolución operativa de la situación se encontraría más próxima a la dinámica y a la cinemática que a la interacción electrostática propiamente dicha, proponemos a los estudiantes que realicen sus valoraciones desde una perspectiva, fundamentalmente, cualitativa. Posteriormente, podremos comprobar cómo se efectúa el proceso de selección de semillas por medio de la simulación correspondiente.



Actividades a realizar con los estudiantes en la resolución:

La carga de las partículas se realiza en base al efecto de ‘descarga en corona’ en el entorno de un delgado alambre conductor. Una fuente de alimentación transfiere electrones hacia la punta del alambre, dejando el alambre con una gran cantidad de carga negativa neta. A medida que la carga negativa se acumula, también aumenta la energía potencial electrostática. Cuando la diferencia de potencial entre el alambre y su entorno sea suficientemente elevada, las cargas negativas comienzan a ser liberadas del alambre al tiempo que son adquiridas por las semillas indeseables circundantes. La transferencia de carga hasta el alambre para que se produzca el efecto corona requiere de una gran cantidad de trabajo, por lo que las fuentes de alimentación utilizadas son a partir de los 10.000V.

Una vez cargadas, las semillas se dejan caer en la región en la que existe un campo eléctrico con componente horizontal (entre un par de placas cargadas eléctricamente, por ejemplo) que desvían las indeseables hacia otro depósito. Es decir, la semilla normal sigue un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado hasta que llega al suelo. Sin embargo, la semilla que no es adecuada adquiere una carga eléctrica, describe un movimiento rectilíneo hasta que entra en la región en la que hay un campo eléctrico que la desvía y al salir, continúa con un movimiento parabólico, ya que tiene componente horizontal de la velocidad.



A.23 Una bola muy pequeña cargada positivamente se encuentra en reposo sobre la base de un plano inclinado sin rozamiento y construido de material aislante. Otra bola pequeña y también positiva se acerca muy despacio y desde muy lejos siguiendo la horizontal de la base del plano inclinado, hasta que ocupa la posición que inicialmente ocupaba la primera bola, y ahí se mantiene fija.

Con objeto de describir cómo evolucionará el sistema, trata de responder a las siguientes preguntas:

- a) ¿A qué será debido que en el enunciado se hagan las siguientes precisiones:(*) las bolas son muy pequeñas, (**) el plano inclinado es de material aislante, (***) la bola se acerca desde muy lejos y muy despacio?
- b) ¿Cuáles son las interacciones sobre la carga que inicialmente ocupaba la posición inferior del plano y qué efecto producen en ella?
- c) ¿De qué magnitudes dependerá la distancia de separación entre cargas en el equilibrio? ¿Cómo será esta dependencia?
- d) ¿Cómo podemos obtener la expresión matemática que ligue estas variables?
- e) ¿Se ajusta el resultado a las hipótesis emitidas? ¿Es dimensionalmente coherente el resultado?

Comentario:

En este problema de electromagnetismo, planteamos una situación abierta en cuanto a que se pide cuál será la evolución del sistema y, para orientar la resolución, se incluyen algunas preguntas. El propio enunciado aporta cierta información sobre las acotaciones a realizar en el planteamiento. Se deja para los estudiantes la justificación razonada del porqué de dichas consideraciones. Así mismo, desde una perspectiva cualitativa, es necesario razonar cómo se alcanzará el equilibrio electrostático final, para lo cual se deberán reconocer todas las interacciones entre las partículas que componen el sistema. La dependencia de la separación de equilibrio con las otras magnitudes, se basará, por un lado, en el análisis de las magnitudes que afectan a la interacción eléctrica (la intensidad de la fuente y la distancia a ella) y, por otro, en efectos mecánicos de otras variables sobre el equilibrio. Esta interacción eléctrica entre cargas puntuales se puede expresar fácilmente por medio de la Ley de Coulomb. Para muchas distribuciones continuas de carga, sin embargo, no podríamos actuar igual. Conviene que los estudiantes reflexionen sobre este aspecto para evitar, en la medida de lo posible, fijaciones estratégicas a esta ley. Un aspecto metodológico de gran interés que se puede trabajar en el contexto de esta situación problemática, es el poder reconsiderar la misma bajo un planteamiento energético. Se podrá poner en evidencia, de esta manera, la coherencia de ambos enfoques en la resolución de un buen número de situaciones, sobre todo si hacemos ver a los estudiantes que las fuerzas que dan lugar a que el sistema evolucione como lo hace, son las que, asociadas a un tipo de energía u otro, intervienen igualmente en la interpretación energética del fenómeno.

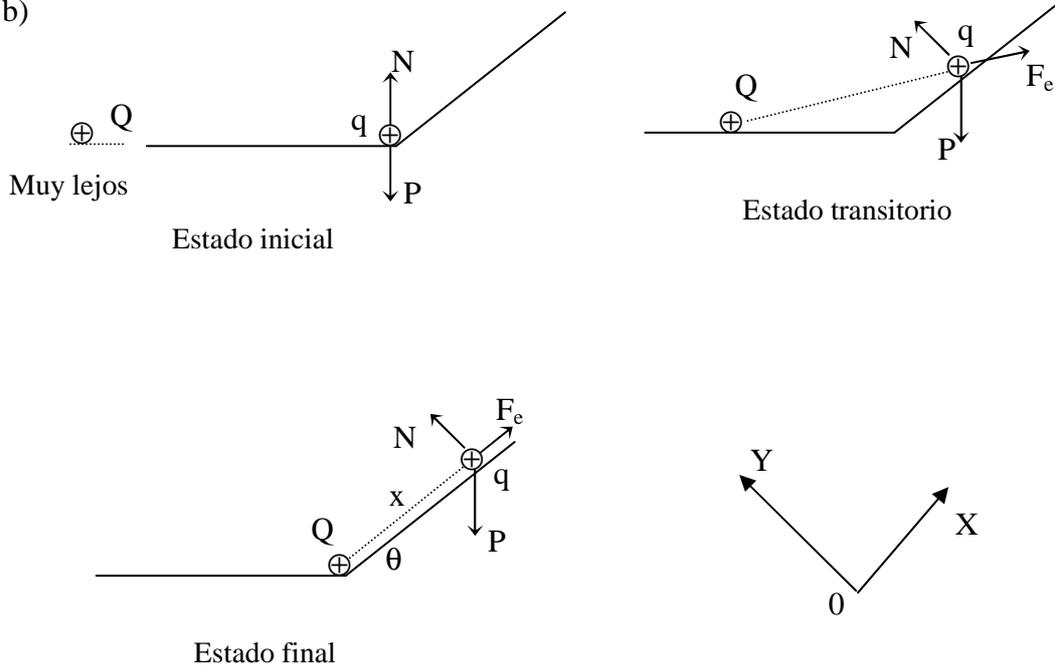


Actividades a realizar con los estudiantes en la resolución:

- a)
 - (*) Si son muy pequeñas podremos considerarlas como cargas puntuales, despreciar posibles efectos de inducción y aplicar la ley de Coulomb.
 - (**) Material aislante en el plano para que las partículas no se descarguen. Aún así, debemos despreciar posibles efectos de inducción en este material.
 - (***) Si se acerca desde muy lejos, inicialmente no existe interacción eléctrica. Si se acerca muy despacio siempre nos encontramos en situación de equilibrio

cuasiestático, (con las dos bolas prácticamente en reposo). Podemos despreciar efectos magnéticos.

b)



A medida que Q se aproxima lentamente a q , sobre esta última actúa su peso, la normal y la fuerza de repulsión eléctrica. En la dirección del eje OX de nuestro sistema de referencia fijo, tenemos dos fuerzas contrapuestas, F_{ex} y P_x . Mientras que $F_{ex} > P_x$, la carga q ascenderá muy despacio por el plano inclinado. Cuando fijamos Q a la base del plano, P_x permanece constante, pero la interacción eléctrica disminuye con la distancia entre cargas. Llegará un momento en el que $F_e = P_x$ alcanzándose el equilibrio estático.

Puede resultar interesante calcular cuál será la separación entre cargas en la situación de equilibrio final.

c)

$$x = x(Q, q, m, g, \theta)$$

Si aumenta Q , aumenta x pues se incrementa la interacción eléctrica.

Si aumenta q , aumenta x pues se incrementa la interacción eléctrica.

Si aumenta m , disminuye x pues se incrementa la interacción gravitatoria que se opone a la eléctrica.

Si aumenta g , disminuye x pues se incrementa la interacción gravitatoria que se opone a la eléctrica.

Si aumenta θ , disminuye x pues se incrementa la componente del peso que se opone a la fuerza eléctrica.

d) En el equilibrio se cumple $OX: mg \cdot \sin\theta = KQq/x^2 \Rightarrow x = (KQq/mg \cdot \sin\theta)^{1/2}$

Donde hemos aplicado la ley de Coulomb por tratarse de cargas puntuales.

e) Se contrasta el efecto de las distintas variables sobre la distancia x , según la expresión matemática obtenida, con las hipótesis previamente emitidas.

Desde el punto de vista dimensional la ecuación es coherente:

$$\left(\frac{\frac{\text{N.m}^2}{\text{C}^2} \text{C.C}}{\frac{\text{kg.m}}{\text{s}^2}} \right)^{1/2} \equiv m$$

Una vez vista la materia correspondiente se puede recuperar el problema para realizar un tratamiento energético de la situación:

¿De dónde surge el trabajo realizado para que el sistema de cargas pase de la situación inicial a la final de equilibrio? ¿Cuánto vale este trabajo?

Como ambas cargas son positivas, el sistema, por sí mismo, no tiende a aproximarse como consecuencia de la fuerza eléctrica (es repulsiva). En consecuencia, desde el exterior algún agente deberá aplicar una fuerza sobre Q que realice un trabajo sobre el sistema y le aporte la energía necesaria para aproximar las cargas, así como para elevar a una de ellas por el plano inclinado.

La parte del trabajo externo utilizada en hacer ascender la partícula por el plano, se acumulará en forma de energía potencial gravitatoria: $E_p = mgh = mgx \sin \theta$, (si $E_p = 0$ para $h = 0$).

La parte del trabajo externo utilizada en acercar las partículas se acumulará en forma de energía potencial electrostática: $U = K \frac{Qq}{x}$, (si $U = 0$ para $x \rightarrow \infty$)

$$\text{El trabajo total será } W = mgx \sin \theta + K \frac{Qq}{x} = \frac{mgx^2 \sin \theta + KQq}{x}$$

y, teniendo en cuenta el valor de x previamente obtenido, queda $W = 2K \frac{Qq}{x} = 2U$

El trabajo realizado desde el exterior es, por tanto, el doble de lo que habría que haber ejercido en el caso de que el desplazamiento de las cargas se hubiera dado sobre la horizontal (sólo interacción eléctrica).

¿Debemos interpretar del planteamiento anterior que la única fuerza que realiza trabajo durante el proceso es la fuerza externa que actúa sobre Q ?

En realidad, de una manera intuitiva a modo de balance de energía, hemos aplicado el teorema de la energía cinética que nos indica que el trabajo de todas las fuerzas que actúan, la externa sobre Q , el peso y la eléctrica en nuestro caso, ha de ser igual a la variación de energía cinética: $W = \Delta E_k$

$$\int (\vec{F}_{ext} + \vec{F}_e + \vec{P}) \cdot d\vec{s} = \int \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{s} + \int \vec{F}_e \cdot d\vec{s} + \int \vec{P} \cdot d\vec{s} = \Delta E_k$$

$$\begin{array}{ccccccc} \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ W & & -\Delta U & & -\Delta E_p & & 0, \text{ eq. cuasiestático} \end{array}$$

Es decir,

$$W = \Delta U + \Delta E_p = K \frac{Qq}{x} + mgx \sin \theta, \text{ que coincide con el planteamiento anterior.}$$



No debemos interpretar, por tanto, que la única fuerza que realiza trabajo durante el proceso es la fuerza externa aplicada sobre Q. Si bien es ésta la causante de que el proceso se desencadene, una vez que las cargas comienzan a desplazarse también realizan trabajo la fuerza eléctrica de repulsión y el peso. Como ambas se oponen al desplazamiento real, la partícula gana energía potencial eléctrica y gravitatoria a costa del trabajo de la fuerza externa que se ha aplicado para vencerlas.