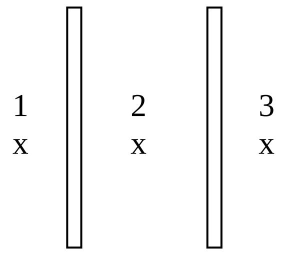
ANÁLISIS ENERGÉTICO DE LOS FENÓMENOS ELÉCTRICOS. POTENCIAL ELÉCTRICO

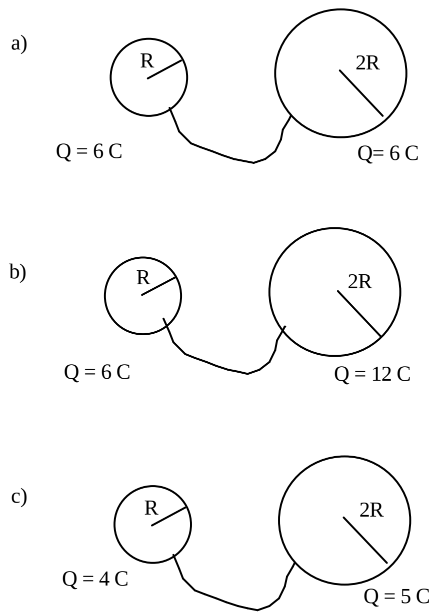
1. ¿Por qué y cómo se mueven las cargas eléctricas?

Hasta ahora hemos estado analizando el movimiento de las cargas desde un punto de vista exclusivamente dinámico, (a través de la fuerza eléctrica, consecuencia de la presencia de un campo eléctrico), vamos a plantearnos en este apartado una estrategia alternativa, de carácter energetista, para resolver el mismo problema.

A.1 Una carga puntual +q se sitúa en la región próxima a dos discos de metal que se encuentran muy cercanos y cargados en oposición. Cuando la carga se sitúa en los puntos 1, 2 y 3 ¿cómo y por qué se mueve? Considera que entre ambas placas metálicas (punto 2), el campo eléctrico es uniforme.



A.2 En la figura se representan dos esferas cargadas en tres situaciones diferentes. El diámetro de la esfera A es la mitad del de la esfera B. Las esferas se conectan por medio de un hilo conductor suficientemente largo. En cada caso, justifica si las cargas se moverán o no.



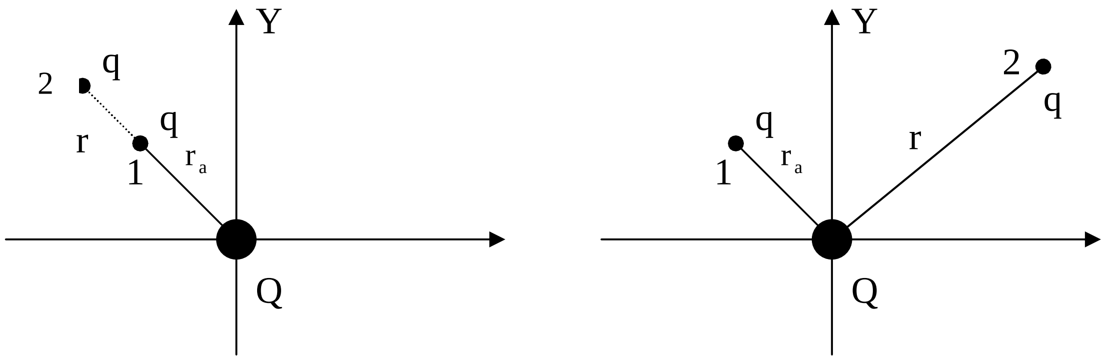
Comentario:

Pretendemos con estas dos primeras actividades, constatar que mediante la utilización del concepto de campo eléctrico, (de fuerza asociada a ese campo), se puede analizar fácilmente, en determinados casos (A.1) y desde un punto de vista dinámico, el movimiento de las cargas eléctricas en una región donde existe un campo eléctrico (obviando los fenómenos magnéticos), pero que en otros (A.2), el problema de analizar el movimiento de cargas mediante el concepto de campo es muy complejo y, por lo tanto sería interesante definir otro concepto físico que permitiese realizar ese análisis de una manera más sencilla.

Nos proponemos, ahora, recordar una serie de conceptos físicos fundamentales imprescindibles para poder analizar este tema con toda la profundidad que se requiere. Estos conceptos serían los siguientes:

- Fuerzas Conservativas
- Energía Potencial asociada al Trabajo que realizan las fuerzas conservativas
- Teorema de la Energía Cinética
- Principio de Conservación de la Energía Mecánica

A.3 Calcular el trabajo que realiza la fuerza electrostática sobre el sistema de dos cargas puntuales, Q y q, para que la carga q, que estaba en principio a una distancia r_a (punto 1) de Q se encuentre a una distancia cualquiera, r (punto 2), respecto de la carga mencionada. Relacionar ese trabajo con la variación de la energía potencial del sistema. Calcular ese trabajo en los dos supuestos indicados en las figuras.



Sugerencia: *En el segundo caso hazlo en dos pasos, uno primero coincidiría con el caso primero donde q es trasladada a través de la recta que une las dos cargas y luego utiliza un arco de circunferencia, con centro en Q que una los dos lugares ¿A que conclusión se llega en ambos casos?*

Comentario:

Se trataría de cuantificar el trabajo realizado por la fuerza eléctrica sobre un sistema de dos cargas puntuales y relacionarlo con la variación de su energía potencial asociada. También se ratificaría, de alguna manera, que ese trabajo no depende de la trayectoria sino de las posiciones inicial y final.

A.4 Del resultado de la actividad anterior ¿se puede deducir que la energía potencial de las dos cargas, cuando están separadas una distancia cualquiera, r, sea $U_r = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}$ y cuando están separadas por una distancia r_a sea $U_{r_a} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r_a}$?

Comentario:

Esta actividad, junto con otras de este tema, trata de sacar a la luz los posibles déficits de tipo memorístico, y por lo tanto de pensamiento acrítico. Es habitual que los estudiantes presenten una fijación que les lleva a asociar irreflexivamente la energía potencial con la correspondiente al caso de que se tome nivel cero en el infinito. Este hecho junto con errores de tipo matemático podría hacer pensar a los estudiantes que es posible deducir lo que el enunciado de la actividad cuestiona.

A.5 a) En el contexto de la A.3 calcular el valor de U_r con la condición de que cuando r→∞, U_r =0.

b) Calcular el valor de U_r con la condición de que cuando r = r_0, U_r = 0, siendo r_0 una distancia finita cualquiera entre las dos cargas que se fija inicialmente de forma arbitraria.

Emitir a la vista de los resultados obtenidos en a) y b), algunas conclusiones que consideres interesantes.

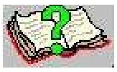
Comentario:

Sabemos que $U_r - U_{r_0} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right]$ (1)

- Si U_r =0 cuando r→∞, se obtiene de (1) que $U_{r_0} = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r_0}$ que llevado a (1) quedaría: $U_r = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}$ (2).

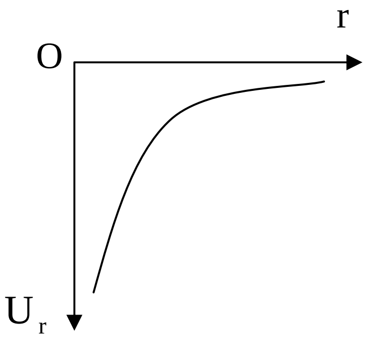
- Si U_r =0 cuando r→r_0, se obtiene de (1) que $U_{r_0} = 0$ que llevado a (1) quedaría: $U_r = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right]$ (3).

A la vista de (2) y (3) se observa que la energía potencial cambia según el origen que se considera como nulo, luego no sólo depende de las cargas y de la distancia sino, también, del nivel cero de energía potencial.



A.6 Un estudiante afirma que: “la energía potencial eléctrica de dos cargas del mismo signo, separadas una distancia r entre ellas, es siempre positiva”. ¿Estarías de acuerdo con ese estudiante? Razónalo.

A.7 Explica las condiciones que se tienen que cumplir para que la gráfica que se presenta a continuación represente la energía potencial eléctrica de un sistema de dos cargas puntuales frente a la distancia que las separa. Por otro lado, expresa con tus propias palabras la información que de dicha gráfica se puede extraer. (La curva es una hipérbola equilátera referida a sus asíntotas).



Comentario:

Abordamos una actividad cuyo principal objetivo es hacer reflexionar a los estudiantes acerca de la transposición de lenguajes matemático, gráfico y verbal para expresar las mismas situaciones físicas. En el ejemplo, para que se trate de una hipérbola equilátera tendremos que haber tomado nivel de energía potencial cero en el infinito (A.5). La asíntota de la representación gráfica es concordante con esta situación. Así mismo, en la representación de la función se observa que la U, en valor absoluto, se hace tanto mayor cuanto más próximas entre sí se encuentren las cargas, lo que se corresponde con el hecho de que la interacción eléctrica se debilite con la distancia. Por otro lado, si para todas las distancias la U es negativa, y teniendo en cuenta dónde se ha elegido el nivel de referencia nulo para el potencial eléctrico, se deberá tratar de un sistema de cargas de signo contrario.

A.8 a) Un estudiante afirma: “en ausencia de otras fuerzas permanentes, cargas de signos iguales, cuando se acercan, se desaceleran perdiendo energía cinética; sin embargo, cargas de signos contrarios, cuando se acercan, se aceleran ganando energía cinética”. ¿Estarías de acuerdo con ese estudiante? b) ¿Quién habrá realizado el trabajo en los dos casos anteriores? Razónalo.

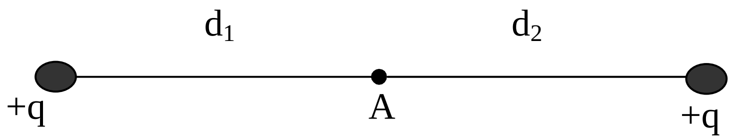
Comentario:

Se pretende que, mediante un enfoque de tipo energético, los estudiantes puedan evaluar el movimiento de cargas en un campo electrostático, así como analizar quién es el agente que ha realizado el trabajo. Veamos: si las cargas son del mismo signo Q.q>0 y si, además, $r_a > r_b$ de acuerdo con $\Delta U = \frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a}\right]$, se tiene $\Delta U>0$. Como la fuerza eléctrica es conservativa, $\Delta E_k<0$, luego el estudiante tenía razón. En cuanto al agente que realiza el trabajo, si bien el campo eléctrico realiza trabajo en ambos casos, en el primero (cargas de signos iguales que se acercan, pero no de forma espontánea por efecto de la fuerza eléctrica) la fuerza eléctrica se ejerce en la dirección opuesta al desplazamiento y, por tanto, el trabajo es negativo. Cuando el trabajo es negativo, por acción de la fuerza eléctrica se pierde energía cinética y se gana energía potencial (a costa del trabajo realizado por otra fuerza distinta a la eléctrica). En el segundo caso, sin embargo, (cargas de signos opuestos que se acercan de forma espontánea por efecto de la fuerza eléctrica) la fuerza eléctrica empuja en la dirección del desplazamiento y, por ello, el trabajo es positivo. Cuando el trabajo es positivo, por acción de la fuerza eléctrica se gana energía cinética y se pierde energía potencial.

Podemos asegurar, entonces, que la interacción eléctrica por si misma y de forma espontánea trata de llevar a las cargas hacia situaciones de menor energía potencial: si son del mismo signo alejándolas y si son de signo contrario acercándolas.

A.9 Retomando los resultados de la actividad A.5, ¿podríamos definir una nueva magnitud física, característica de la carga Q, en su entorno, que no dependiera de la carga q, de manera que la energía potencial se pudiese expresar, de una forma sencilla, en función de esa nueva magnitud?... ¿cómo? Recuerda cómo definimos el campo a partir de la fuerza, con independencia de la carga de prueba.

A.10 ¿Qué te sugiere el hecho, experimentalmente comprobado, de que al calcular el potencial eléctrico que crearían dos cargas, de valor +q cada una, en el punto A, valiese (si elegimos $V_\infty = 0$): $V_A = \frac{Kq}{d_1} + \frac{Kq}{d_2}$?



Comentario:

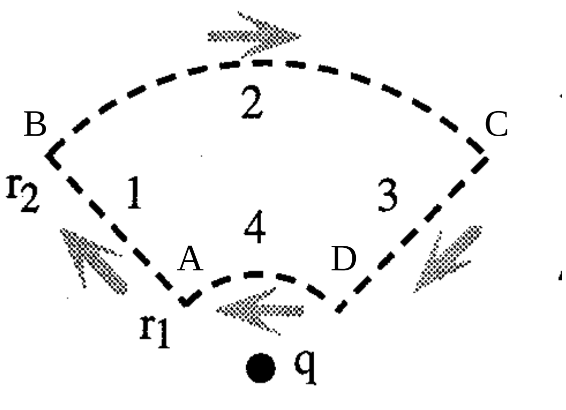
El objetivo de las últimas actividades es introducir un concepto, potencial eléctrico, (matemáticamente hablando sería habría que hablar primero de incremento de potencial), que fuese a la energía potencial lo que el campo es a la fuerza, es decir un concepto, energético en este caso, que no dependiese más que del agente creador del campo y no de la carga de prueba que se introduce en la región donde existe ese campo.

Resaltamos que una carga crea en el espacio que le rodea dos ‘propiedades’, una vectorial: el campo, y otra escalar: el potencial. Dejamos la puerta abierta para posteriores actividades que nos permitan relacionarlos operativamente.

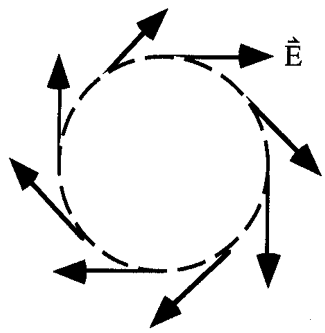
Finalmente, contrastamos un hecho de la naturaleza, también para el potencial eléctrico, cual es el principio de superposición, que nos va a resultar muy útil, entre otras situaciones, cuando se pretenda calcular el potencial eléctrico creado por una distribución continua de carga.

A.11 a) Un estudiante afirma: “El trabajo necesario para trasladar una carga q, situada en el campo eléctrico que crea otra carga Q, desde una posición en la que q se encuentra a una distancia r_a de Q hasta otra posición en la que q se encuentra a una distancia r_b de Q es igual a: $W = q(V_{r_a} - V_{r_b})$”. ¿Estarías de acuerdo con ese estudiante?
b) Si esa relación fuera cierta ¿cómo podríamos relacionar esa variación del potencial con el campo eléctrico existente en la zona, debido a la carga Q?

A.12 ¿Cuál es el trabajo que hay que realizar para trasladar, partiendo del punto A, una carga unidad una vuelta completa a lo largo de la trayectoria de la figura? ¿Cuánto valdría la diferencia de potencial en cada uno de los cuatro tramos? ¿Se puede prever, sin realizar la suma de los cuatro tramos, cuál va a ser la diferencia de potencial total?¿Por qué?



A.13 ¿Podría existir alguna configuración de cargas eléctricas tales que el patrón de campo eléctrico, a lo largo de un camino circular, fuera el que se muestra en la figura? *Sugerencia*: *observa el resultado de la actividad anterior*.



Comentario:

Se intenta relacionar el trabajo para trasladar una carga, (movimiento de cargas, utilizando un enfoque energético), con el incremento del potencial eléctrico. Además, analizar una primera relación entre el incremento de potencial y la integral de línea del campo eléctrico.

Constatamos, una vez más, que la fuerza eléctrica es conservativa y, en consecuencia, el trabajo que realiza en un ciclo es nulo y por lo tanto también es nulo el incremento de la energía potencial y el incremento del potencial en dicho ciclo. En función de lo anterior, verificaremos que, si la fuente del campo eléctrico son las cargas eléctricas, un patrón de campo como el reflejado en la figura no se puede dar, dejando abierta la puerta al hecho de que, con otra fuente distinta, esa posibilidad no es descartable. Sería también una actividad para contrastar con lo que sucede en el campo magnético estacionario.

A.14 Basándote en la actividad A.11, ¿estarías de acuerdo con la siguiente afirmación?: “las cargas positivas son trasladadas por el campo eléctrico existente en la zona, (por la fuerza eléctrica debida a ese campo), según los potenciales decrecientes; por el contrario si la carga que se traslada es negativa, el campo eléctrico la llevará según los potenciales crecientes. Razona tu respuesta.

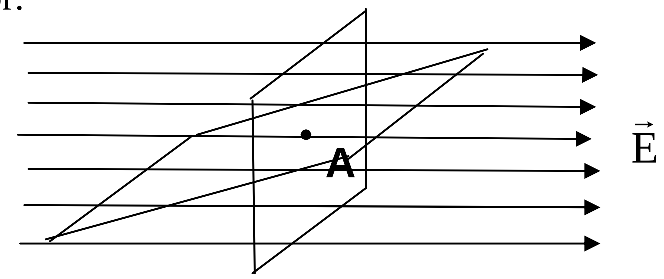
2. ¿Se podría, de forma similar al campo eléctrico, representar gráficamente el potencial eléctrico?

Hemos analizado en estas últimas actividades la posibilidad de explicar el movimiento de las cargas eléctricas desde una perspectiva energética. Ello ha sido posible por el hecho de que la fuerza eléctrica sea conservativa. Puesto que las magnitudes energéticas son escalares y, además, para comprender múltiples situaciones basta con conocer sus valores iniciales y finales sin importar el camino seguido, este nuevo enfoque es sumamente útil en la electrodinámica, (corrientes eléctricas, circuitos...). En las siguientes actividades trataremos de relacionar, más en profundidad, los dos enfoques alternativos considerados hasta el momento: el de campo y el de potencial.

A.15 Supongamos que disponemos de una carga eléctrica puntual de valor Q. Dibuja, razonándolo, que figura formarían todos los puntos del espacio que en el entorno de esa carga tuvieran el mismo potencial eléctrico debido a ella. (Supón que tomamos nulo el potencial en el infinito).

A.16 En una región del espacio donde existe un campo eléctrico como el representado en la figura, un estudiante E1, ante la pregunta de cómo sería una superficie equipotencial que pasara por A, dibuja un plano perpendicular a las líneas de campo; otro estudiante, E2, sin embargo, ante la misma cuestión, dibuja un plano que forma un cierto ángulo con las líneas del campo. ¿Con quién estarías de acuerdo, con E1 o con E2? Razónalo.

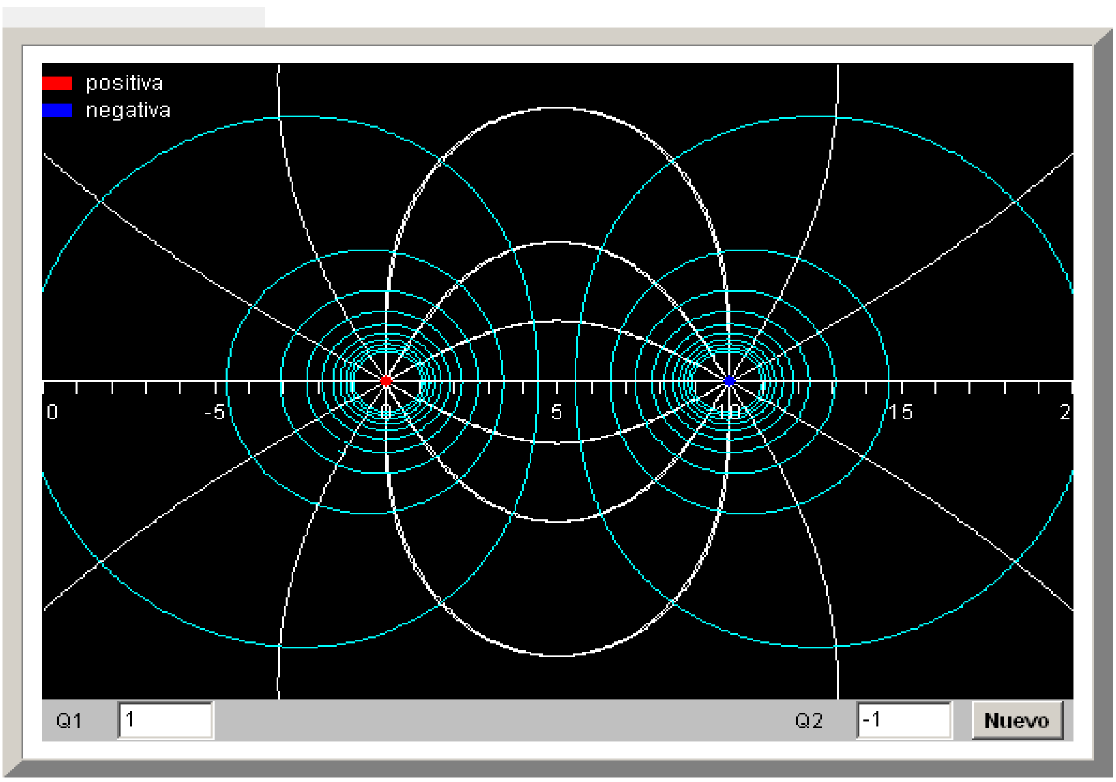
Completa el mapa de líneas de fuerza y superficies equipotenciales de la actividad anterior.



Comentario:

Se trataría de definir el concepto de superficie equipotencial, que nos va a dar una representación gráfica, (de una forma complementaria a las llamadas líneas de campo), de la propiedad escalar ‘potencial’ en la región del espacio donde está definido un campo eléctrico. Por otro lado, justificamos que las líneas de campo y las superficies equipotenciales deben ser perpendiculares entre sí.

A.17 Haciendo uso de la simulación, ‘Campo y potencial de dos cargas’, dibuja el diagrama de líneas de campo y superficies equipotenciales de un sistema de dos cargas puntuales considerando las siguientes posibilidades:



a) Dos cargas iguales y del mismo signo. b) Dos cargas iguales y de distinto signo. c) Dos cargas distintas y del mismo signo. d) Dos cargas distintas y de distinto signo.

Verifica las predicciones de los estudiantes en la actividad anterior.

¿Observas alguna peculiaridad en la separación entre superficies equipotenciales contiguas? ¿Sabrías justificarlo?

Comentario:

El fislet permite visualizar las líneas de campo y las superficies equipotenciales del sistema de dos cargas puntuales. Se incide, nuevamente, en la perpendicularidad entre líneas de campo y equipotenciales y se plantea el interrogante, (cuya respuesta se abordará posteriormente, haciendo uso del concepto de gradiente), referido a la separación entre equipotenciales contiguas.

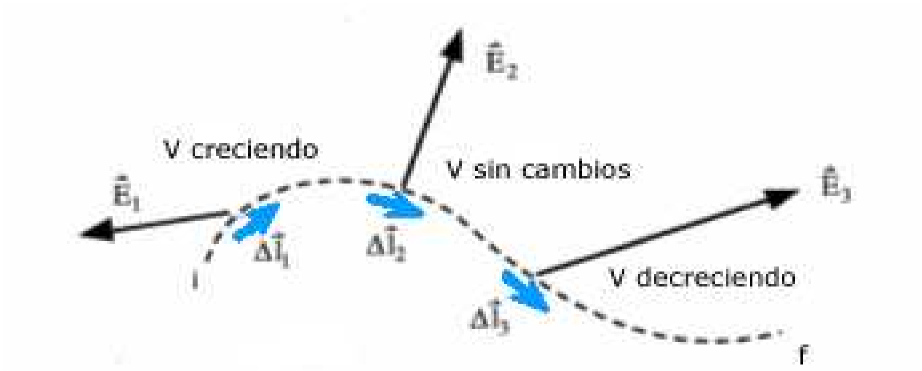
3. ¿Cómo están relacionados el campo eléctrico y la variación del potencial eléctrico?

Una vez analizado el campo eléctrico por un lado, (punto de vista dinámico), y el potencial eléctrico por otro, (enfoque energetista), la cuestión que ahora nos vamos a plantear, es encontrar la relación existente entre los dos, de manera que conociendo uno de ellos estemos en disposición de averiguar el otro.

A.18 El término ‘gradiente’ se utiliza para indicar la variación de alguna magnitud entre dos puntos. Si el potencial eléctrico en una región varía 1voltio en 1mm ¿cuál sería el gradiente de potencial? ¿Identificas las unidades del gradiente de potencial con las de alguna magnitud conocida?

A.19 ¿Sería posible encontrar la dirección, sentido y magnitud del campo eléctrico en una región del espacio, conociendo cómo va variando el potencial eléctrico en dicha región? (Concepto de gradiente de potencial).

A.20 Explica el significado de la figura, en lo que al potencial eléctrico se refiere, atendiendo a los siguientes aspectos: a) Orientación relativa del campo y del desplazamiento en función de la variación de potencial. b) Magnitud del campo en función de la mayor o menor variación del potencial.



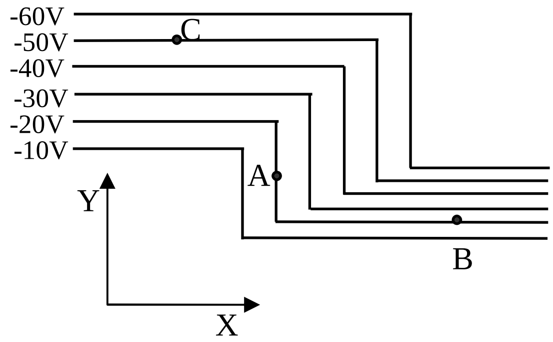
A.21 Si por convenio, las superficies equipotenciales se dibujan de manera que entre dos contiguas siempre existe el mismo incremento de potencial, ΔV, ¿estarías de acuerdo con la siguiente afirmación?: "si tenemos una región del espacio donde existe un campo eléctrico y observamos su patrón de superficies equipotenciales, podemos asegurar que en aquellas zonas donde dichas superficies están más cercanas entre sí, el campo eléctrico es mayor que en aquellos lugares donde, por el contrario, las superficies están más separadas". Razona tu respuesta.

Comentario:

El objetivo de estas actividades sería introducir el concepto de gradiente de potencial, que relaciona el campo eléctrico con la variación del potencial a nivel 'diferencial'; haciendo especial hincapié en la interpretación física de ese concepto, que desde el punto de vista matemático, tiene una cierta complejidad. Pretendemos, así mismo, constatar que el campo eléctrico se orienta según los potenciales decrecientes. Esto tendrá aplicaciones interesantes en la electrodinámica. Además, teniendo en cuenta la definición de superficie equipotencial, (también el convenio para dibujar superficies equipotenciales), así como el concepto de gradiente, (o en su caso mediante el concepto de trabajo e incremento de energía potencial asociada), constatar que con sólo la visión de las superficies equipotenciales podemos saber, desde un punto de vista cualitativo, la mayor o menor intensidad del campo en una determinada región donde exista dicho campo.

A.22 a) Suponiendo que se conoce el potencial eléctrico en un punto. ¿Puede calcularse el valor del campo en dicho punto sólo con esa información? b) Si la diferencia de potencial eléctrico es nula en un desplazamiento ¿qué puede deducirse acerca del campo eléctrico en esa región? c) Si el campo eléctrico es nulo en una región ¿qué puede deducirse acerca del potencial eléctrico en esa región?

A.23 La intersección con el plano XY de las superficies equipotenciales correspondientes a un cierto campo eléctrico da lugar a una distribución de líneas equipotenciales como la indicada en la figura. Dada una carga puntual –q, razonar:

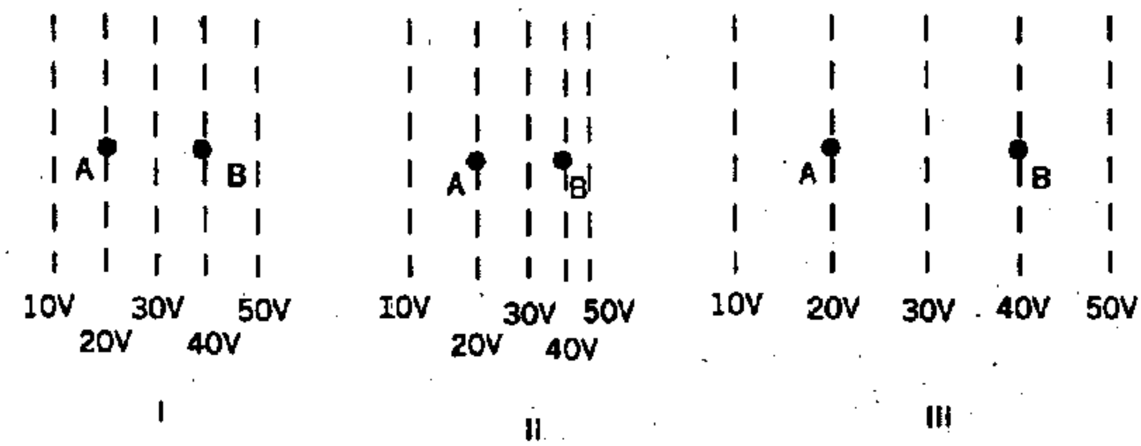


a) El signo del trabajo realizado para llevar la carga desde el punto B hasta el A. También desde el punto C hasta el A.

b) Si la carga se sitúa en reposo en los puntos: A, B y C ¿en cuál de ellos la aceleración será mayor?

c) ¿Qué dirección y sentido tiene esa aceleración?

A.24 La figura muestra las líneas equipotenciales de un campo eléctrico. Una carga de +1μC se mueve del punto A al punto B.



1) En lo referente al trabajo necesario para mover la carga en cada uno de los tres casos, ¿con qué afirmación estarías de acuerdo? Razónalo.

a) El máximo trabajo se realiza en la situación I
b) El máximo trabajo se realiza en la situación II
c) El máximo trabajo se realiza en la situación III
d) En las situaciones I y II se requiere la misma cantidad de trabajo, pero menos que en la situación III
e) En los tres situaciones se requiere la misma cantidad de trabajo

2) ¿Cómo es la magnitud del campo eléctrico en B en cada uno de los casos?

a) I>III>II
b) I>II>III
c) III>I>II
d) II>I>III
e) I=II=III

3) Para el caso III, ¿cuál es la dirección y sentido de la fuerza eléctrica, asociada al campo eléctrico, sobre la carga de +1μC cuando está en el punto A y en el punto B?

a) Hacia la izquierda en A y hacia la izquierda en B
b) Hacia la derecha en A y hacia la derecha en B
c) Hacia la izquierda en A y hacia la derecha en B
d) Hacia la derecha en A y hacia la izquierda en B
e) No hay fuerza eléctrica en ningún caso

Comentario:

En estas últimas actividades hay aplicar de manera interrelacionada muchos de los aspectos abordados hasta el momento. En consecuencia, son actividades de reflexión, aplicación y autoevaluación en las que debería predominar el trabajo autónomo de los estudiantes.

4. ¿Cómo podríamos calcular el potencial eléctrico creado por distribuciones continuas de carga?

Hasta llegar aquí hemos estado analizando, fundamentalmente, los potenciales creados por cargas puntuales, sin embargo, en muchos casos el campo eléctrico y el potencial son generados por cuerpos extensos que tienen una cierta carga. Teniendo en cuenta el principio de superposición del potencial, así como la relación entre el campo y la variación del potencial, resolveremos las situaciones problemáticas objeto de la cuestión precedente.

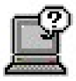
A.25 ¿Cómo se podría calcular el potencial eléctrico creado por una distribución continua de carga si se conoce el campo eléctrico que genera? y ¿si no se conociera dicho campo?

Comentario:

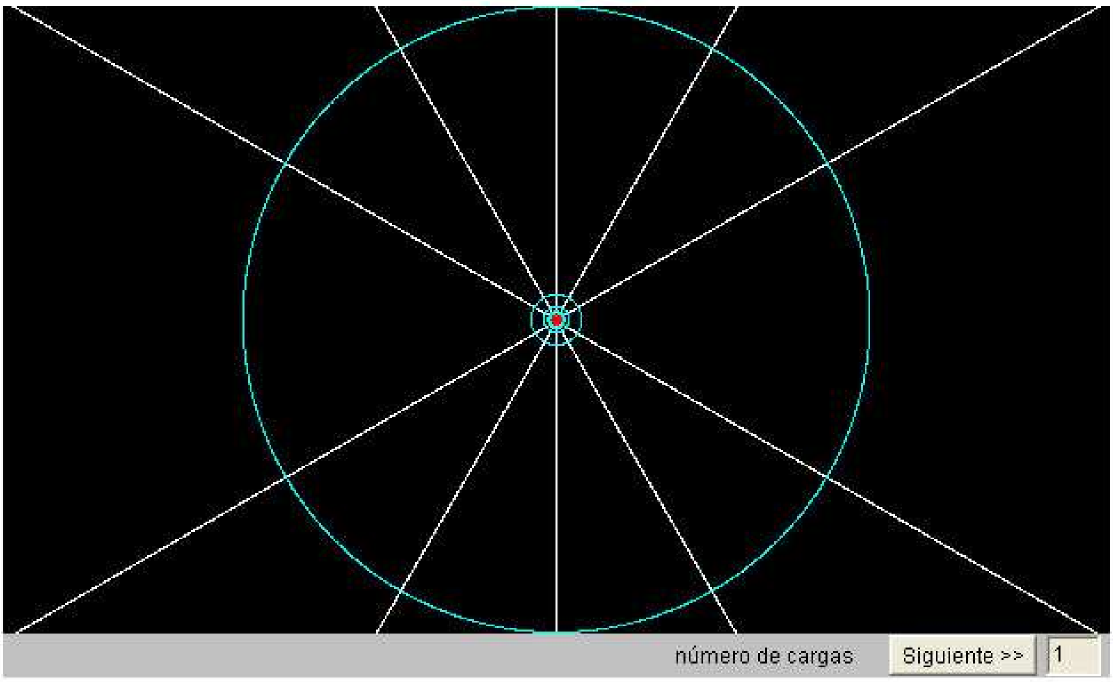
Se pretende analizar, desde un punto de vista cuantitativo, cómo se calcularía el potencial creado por una distribución continua de carga en dos supuestos: a) cuando se conoce el campo eléctrico en cuyo caso, haciendo uso de la relación entre el campo y el potencial, obtendríamos este último por integración; b) cuando no se conoce dicho campo, se divide el cuerpo en elementos diferenciales cada uno de los cuales crearía un dV como si fuera una partícula puntual y, posteriormente, en base al principio de superposición integraríamos para obtener el potencial total. En las siguientes actividades realizamos aplicaciones concretas, que completarían el cálculo del campo eléctrico realizado en lecciones anteriores.

A.26 Calcular el potencial eléctrico creado por una corteza esférica conductora de radio R y carga Q. Representa gráficamente el resultado. Dibuja las superficies equipotenciales.
Tomar V=0 cuando $r \rightarrow \infty$.

A.27 Calcular el potencial eléctrico de un 'plano infinito' con densidad superficial de carga σ que suponemos constante. Representa gráficamente el resultado. Dibuja las superficies equipotenciales.
Tomar V=0 cuando $r \rightarrow 0$.



A.28 En el fislet 'Campo producido por un conjunto de cargas iguales e igualmente espaciadas' en 'línea de cargas', se muestra las líneas de campo eléctrico (en color blanco) de hasta ocho cargas iguales y equidistantes que se encuentran alineadas. Basándote en estas observaciones, ¿podrías dibujar el mapa de líneas de campo y superficies equipotenciales de un hilo rectilíneo con gran cantidad de carga uniformemente repartida?



A.29 Calcular el potencial eléctrico creado por un hilo rectilíneo 'largo' que tiene una densidad lineal de carga uniforme, λ. Representa gráficamente el resultado. Tomar V=0 cuando r=1. Dibuja las superficies equipotenciales.

Comentario:

Estas últimas actividades ofrecen una nueva ocasión para resaltar la posibilidad de elegir el nivel cero de potencial en diferentes posiciones e incidir,

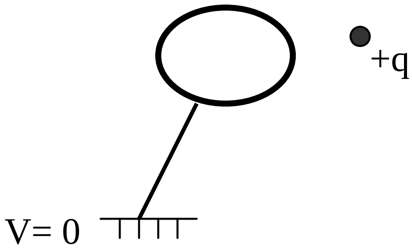
de nuevo, en la ya anteriormente abordada tendencia de los estudiantes a tomar potencial nulo en el infinito. La elección de las diferentes distancias a las que se asigna potencial cero, parece estar relacionada, en los distintos casos, con aquellas posiciones en las que la expresión matemática resultante para el potencial sea la más sencilla y manejable.

A.30 Intenta, una vez analizado en profundidad el enfoque energetista de este tema, contestar a la situación problemática que se presentó en A.2.

Comentario:

Una vez analizada en profundidad esta lección, se trataría de dar respuesta en base a conceptos energéticos a una cuestión, la A2, que nos habíamos planteado al principio de la lección y que supuestamente la mayoría de los estudiantes no habría sabido responder de forma coherente con el cuerpo de conocimientos de la ciencia física.

A.31 Consideremos un conductor no cargado, como el de la figura, al que conectamos a tierra (V=0), mediante un hilo conductor. Además colocamos en sus cercanías una carga puntual positiva +q.



a) Explica qué sucederá durante el período de tiempo, (transitorio), en el que todavía no se ha llegado al equilibrio electrostático.

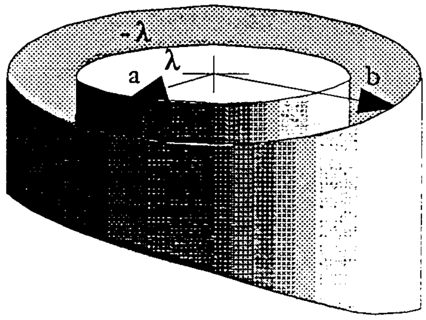
b) Una vez que ya se ha llegado a dicho equilibrio, justifica si estás de acuerdo con las siguientes afirmaciones:

b1) “El potencial en todos los puntos del conductor vale cero”.

b2) “El conductor permanece descargado”.

Comentario:

El objetivo sería múltiple: a) utilización de aspectos vistos en el primer capítulo del tema (inducción-polarización), es decir, en el transitorio, debido al campo creado por la carga exterior el cuerpo se polariza por inducción; b) utilización del concepto de potencial para estudiar el movimiento de cargas, esto es, al conectar a tierra el cuerpo ganará una cierta carga negativa procedente de tierra (los electrones se desplazan según los potenciales crecientes, cuando están sometidos sólo al campo eléctrico); otra forma muy común de hablar es decir que perderá parte de la carga positiva inducida la cual se desplazará hacia potenciales decrecientes (potencial cero en tierra); c) utilización del principio de superposición del potencial, aspecto éste que, en muchas ocasiones, no se aplica correctamente. Así, el movimiento de carga se produce hasta que el cuerpo queda con potencial nulo. Sin embargo, en esta situación, el cuerpo no se encuentra completamente descargado pues su potencial será cero cuando contenga carga negativa, de tal manera que la suma del potencial creado por ésta y el creado por la exterior positiva sea igual a cero.



A.32 Se tienen dos cilindros infinitamente largos, huecos, de fina pared y concéntricos, de radios a y b, siendo $a < b$, $a < 1$ y $b > 1$, cargados uniformemente con cargas por unidad de longitud, iguales y opuestas de valores λ y $-\lambda$ interior y exterior respectivamente. Calcular el campo eléctrico y el potencial eléctrico en puntos a una distancia r del eje común: 1º) $\forall r > b$; 2º) $\forall r < a$ y 3º) $a \leq r \leq b$. Realiza un análisis gráfico de los resultados obtenidos, en lo que se refiere a la función del potencial eléctrico con respecto a la distancia al eje de la figura.
Nota: Para el cálculo del potencial eléctrico, toma el nivel de referencia cero, para dicho potencial, cuando $r=1$

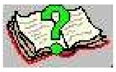
Comentario:

Se pretende que los estudiantes pongan en juego diferentes conceptos que se han ido analizando a lo largo de todo el tema. Primeramente, es conveniente resaltar que, si bien la carga se encuentra realmente repartida en las superficies de los cilindros, si los consideramos muy largos, podemos realizar la aproximación de que la distribución es lineal. En cuanto a la obtención del campo en las diferentes regiones, los estudiantes deberán razonar la aplicabilidad de la ley de Gauss en base a la simetría del sistema de modo que, eligiendo como superficies gaussianas superficies cilíndricas coaxiales con las dadas y de radios adecuados, el cálculo del flujo por su definición integral resulta sencillo y, en consecuencia, la obtención del campo también.

Por otro lado, para la obtención del potencial en las diferentes regiones una vez conocido el campo, será necesario hacer uso del concepto de gradiente (ya aplicado anteriormente) y, al mismo tiempo, tener en consideración el principio de unicidad del potencial eléctrico. Será la aplicación del hecho de que el potencial tome un único valor en cada punto del espacio lo que nos permitirá discernir cuál es el potencial en aquéllas regiones en las que, tras aplicar el gradiente, como resultado de que el campo es nulo se concluya que el potencial es constante.

Finalmente, se hará especial hincapié en el aspecto del paso del lenguaje matemático al gráfico y viceversa.

Como nueva perspectiva derivada de la resolución del problema, se podría pedir a los estudiantes que lo resolvieran con diferentes niveles de potencial cero, por ejemplo, potencial cero en el infinito.



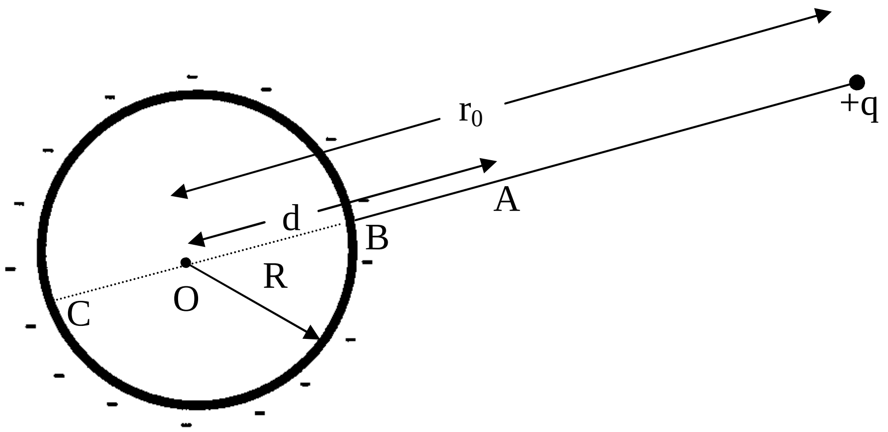
A.33 Una partícula de masa m y carga +q, inicialmente en reposo, se aproxima a una corteza esférica, que tiene de radio R y está cargada con una densidad superficial de carga uniforme - σ (ver figura).

a) Calcula la velocidad de la partícula +q, previa emisión de hipótesis de variables, en un punto cualquiera de su trayectoria de acercamiento. (Punto A).

b) Analiza, a la luz de las hipótesis previamente emitidas, así como de las conclusiones de la actividad A.8, el resultado obtenido.

c) Supongamos que hacemos un agujero en el lugar en el que la carga +q impacta con la corteza esférica, (punto B), ¿seguirá viajando la partícula por el interior de la esfera?; si es así, ¿existirá alguna relación entre las velocidades de los dos puntos de impacto, (B y C), con la corteza? Razónalo desde un punto de vista puramente cualitativo. [Puedes cotejar tu respuesta a la vista del resultado obtenido en el apartado a)]

Nota: El punto A representa un punto cualquiera en la trayectoria de acercamiento, el B el primer punto de impacto y el C el segundo punto de impacto en caso de que este último se produjera.



Comentario:

Nos encontramos ante una actividad de aplicación de todos los conceptos vistos a lo largo de la lección que permite hacer especial hincapié en aspectos procedimentales, tales como la emisión de hipótesis y la elaboración de estrategias alternativas.

Comenzaríamos realizando algunas acotaciones, como considerar que en la posición inicial la interacción eléctrica es perceptible, que la partícula se mueve únicamente por efecto de la interacción eléctrica y que despreciaremos los efectos de inducción.

Un análisis de las variables de las que puede depender la velocidad de la carga al pasar por A, nos llevaría a poder justificar, tanto en base a un razonamiento cinemático-dinámico como a otro energético, que $v_A = v_A(q, r_0, d, \sigma, m, \varepsilon)$.

Teniendo en cuenta que la única interacción sobre el sistema es conservativa (la interacción eléctrica), la aplicación del principio de conservación de la energía nos conduciría, de una manera sencilla, a obtener la expresión de la velocidad pedida: $v_A = \sqrt{\frac{2q\sigma R^2}{m\varepsilon}\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{d}\right)}$ (1). (Con σ negativa)

Si tratamos de resolver la situación por una vía cinemático-dinámica, como consecuencia de que la interacción eléctrica varía con la posición que ocupa la carga que se desplaza, la aceleración resultante es variable con el tiempo. Esto hace que la resolución cinemática para obtener la velocidad no sea la más sencilla para el nivel que nos ocupa. En este sentido, nos encontramos ante una situación en la que conviene estar atento a la muy extendida 'fijación' de los estudiantes a considerar que la aceleración es constante y aplicar, por ello, las fórmulas del M.R.U.A.

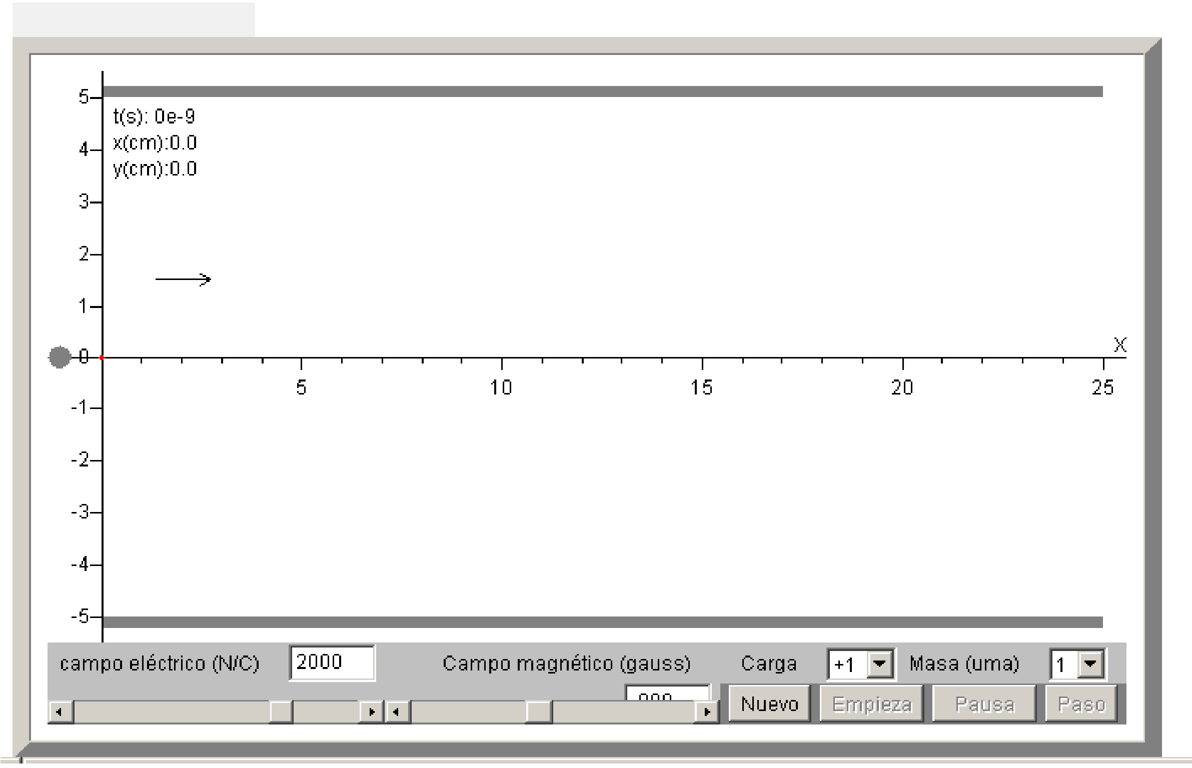
Tras obtener la expresión (1), es factible contrastar las hipótesis de dependencia de variables previamente emitidas aunque, en este caso, el análisis presenta una cierta dificultad para los estudiantes.

Una vez que la partícula penetra en la corteza esférica en cuyo interior el campo es nulo, es sencillo razonar, tanto en base a energías como dinámicamente, que la velocidad permanecerá constante y con el valor obtenido en la expresión (1) haciendo d=R, es decir, $v_B = v_C$.

A.34 Una carga puntual penetra en un campo eléctrico uniforme con velocidad v_0, ¿qué le sucederá? Valora sucesivamente:

- ¿Cómo será su velocidad en el interior del campo eléctrico?
- ¿Cuál será su trayectoria?
- Confronta los resultados con el caso límite en que no haya campo eléctrico en la región.

Una vez obtenida la ecuación de la trayectoria, haz uso de la simulación 'Fuerzas sobre las cargas' en 'Movimiento de las partículas cargadas', para contrastar la coherencia del resultado valorando el efecto de las variables q, E y m sobre la desviación sufrida por la partícula.

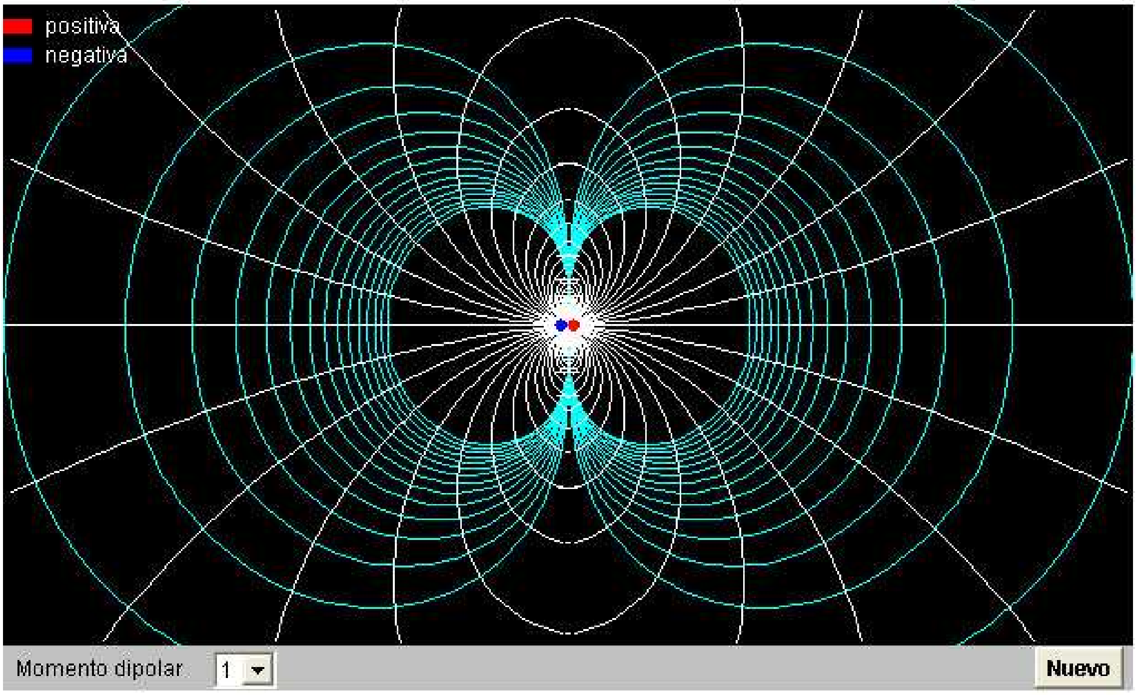


A.35 Se introduce un dipolo en un campo eléctrico uniforme.

- Dibuja el dipolo y la fuerza eléctrica sobre él.
- ¿Puedes imaginar cómo cambia la posición del dipolo en virtud de la fuerza eléctrica que actúa sobre él?

A.36 a) Momento dipolar y energía de un dipolo en un campo eléctrico uniforme.

b) En la simulación ‘Dipolo eléctrico’, se aprecian las líneas de campo y superficies equipotenciales en las proximidades de un dipolo eléctrico. Razona las distintas separaciones entre líneas contiguas y superficies contiguas.
c) Dipolo en un campo eléctrico no uniforme.
d) ¿Podrías dar alguna razón por la cual estudiamos con más detalle el dipolo que otras distribuciones de cargas puntuales?



Comentario:

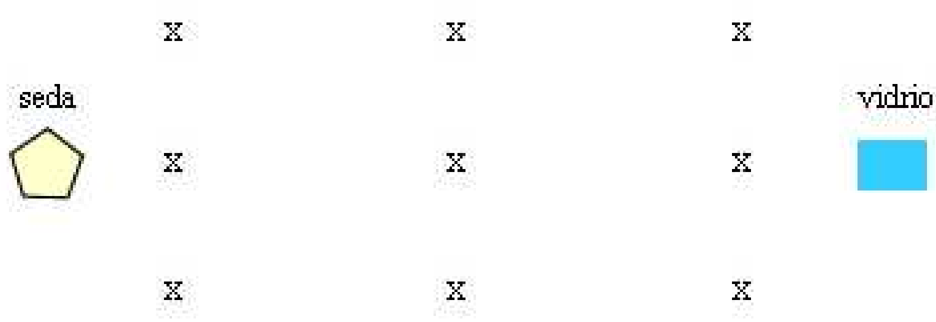
Con este conjunto de actividades pretendemos analizar algunos movimientos sencillos, pero importantes, de las cargas eléctricas en el interior de un campo eléctrico. Estudiamos, así mismo, el dipolo eléctrico cuya comprensión resulta fundamental para entender el comportamiento de los materiales dieléctricos en el interior de un campo eléctrico.

5. ¿Cómo se comporta la materia en presencia de campos eléctricos?

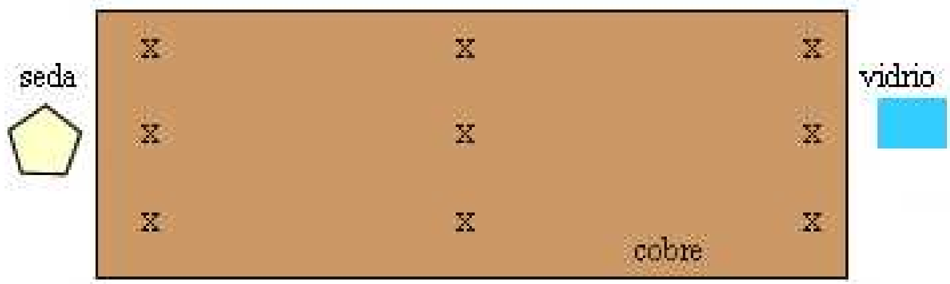
Como consecuencia de que la interacción eléctrica es capaz de penetrar en la materia, cargas eléctricas externas pueden interactuar con las partículas cargadas del interior de un cuerpo neutro. En esta sección tendremos que analizar la estructura microscópica de la materia para poder explicar el comportamiento de ésta en presencia de campos eléctricos aplicados desde el exterior.

A.37 Se frota una esferita de vidrio con un pequeño trapo de seda, quedando, como consecuencia, la esfera cargada de manera positiva. A continuación se colocan ambos a unos centímetros de distancia como indica la figura.

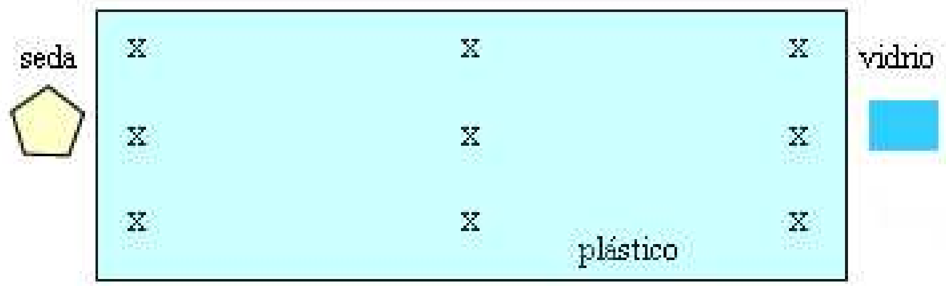
a) Dibuja razonadamente los vectores campo eléctrico (ten en cuenta aparte de su dirección los valores relativos aproximados de sus módulos), en los puntos señalados con una x:



b) Posteriormente colocamos entre la seda y el vidrio una placa de cobre. Razona la distribución de carga que se dará en el cobre y al igual que en el apartado anterior dibuja el vector campo eléctrico en los puntos marcados con x:



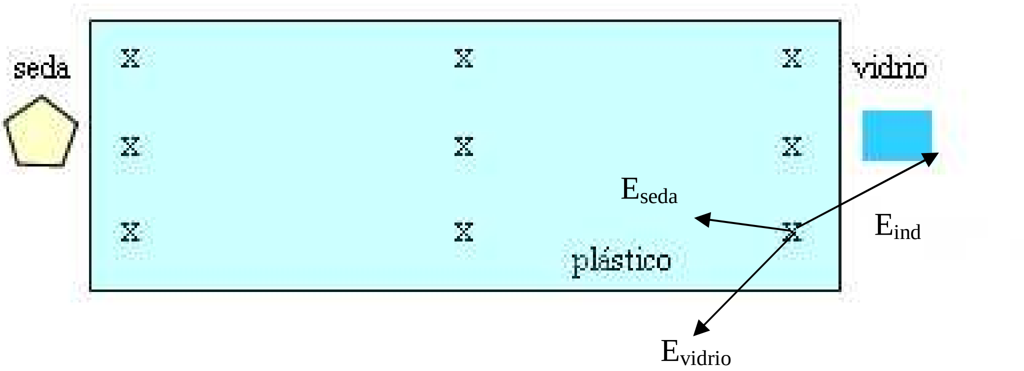
A.38 Supongamos que en la actividad anterior introducimos entre el vidrio y la seda (previamente frotados) un bloque de plástico. Explica la polarización eléctrica molecular que se dará en los puntos señalados con una x:



Comentario:

Se intenta indagar en la respuesta que ofrecen diversos materiales neutros (conductores y aislantes) ante la interacción eléctrica producida como consecuencia de cuerpos próximos que se encuentran cargados.

En la primera situación planteada en la A.37, los estudiantes no deberían encontrar ninguna dificultad para representar el vector campo resultante en cada punto, pues se trata de aplicar el principio de superposición para interacciones en el vacío. Cuando el medio es conductor, como en el caso b) de la A.37, los estudiantes deberán reconocer que el metal se polariza como consecuencia de la inducción total producida por el movimiento de sus electrones libres al interaccionar con el campo externo aplicado. En cada punto de su interior, la aplicación del principio de superposición debería hacer ver a los estudiantes que la resultante de los tres campos (debido a la seda, al vidrio y el campo inducido) sugiere un campo resultante nulo. Es muy probable, sin embargo, que esta cuestión permanezca sin clarificarse hasta posteriores actividades (A.39). Así, para el punto inferior derecho, se encontraría:



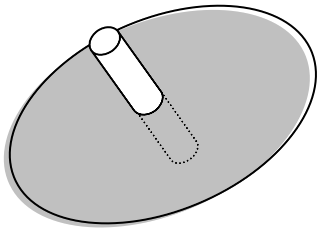
En la A.38, es necesario comenzar a valorar la polarización de las moléculas que componen el dieléctrico. Para ello, es necesario considerar, por un lado, que el grado de polarización depende de la distancia de la molécula al agente externo que crea el campo (a mayor distancia, menor polarización, menor separación entre cargas del dipolo, menor momento dipolar de la molécula) y, por otro lado, que el campo aplicado hacer girar a las moléculas polarizadas tendiendo a alinearlas con dicho campo. Se produce una densidad de carga inducida cuyas características abordaremos con más detalle en el tema de condensadores.

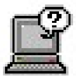
A.39 a) Demuestra que el campo eléctrico en el interior de un conductor en situación de equilibrio electrostático es nulo. ¿Qué sucedería si a un conductor en equilibrio se le aplicara un campo externo?
Vuelve a la A.37 y completa la respuesta para el apartado A.37-b.
b) Los componentes de ciertos aparatos electrónicos sensibles a los campos electromagnéticos se transportan, en ocasiones, en recipientes conductores. ¿Cómo justificarías que, de esa manera, los componentes queden protegidos? Jaula de Faraday.

A.40 ¿Dónde se ubican las cargas en un conductor cargado en equilibrio electrostático? Puedes aplicar la ley de Gauss para una superficie interior al conductor, (que esté muy próxima a su superficie), y aplicar el resultado de la actividad anterior.

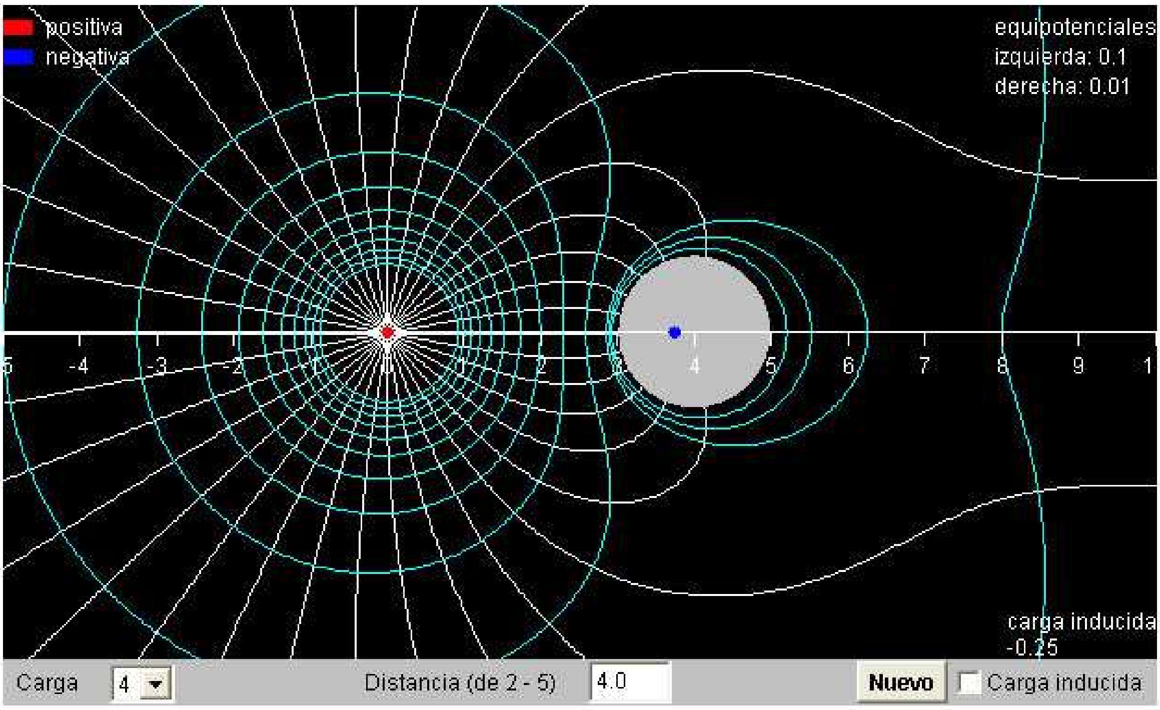
A.41 a) Un estudiante dice que el campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático es, en todo punto, perpendicular a dicha superficie. Otro estudiante bajo las mismas condiciones del conductor, (cargado y en equilibrio) manifiesta que el campo eléctrico es siempre tangente en cada punto a la superficie ¿Quién tiene razón? ¿Por qué?

b) ¿Cuál es el valor del campo en dicha situación? Puedes aplicar la ley de Gauss para una superficie cilíndrica muy pequeña cuya cara lateral sea perpendicular a la superficie del conductor y sus bases una de ellas interna y la otra externa al conductor.

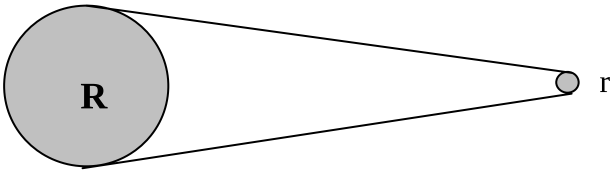




A.42 En el fislet 'Carga Inducida en un conductor', se muestran las líneas de fuerza y las superficies equipotenciales de un sistema formado por una carga puntual y una esfera conductora conectada a tierra. Observa las líneas de campo, las superficies equipotenciales y la carga inducida y trata de contrastar los resultados obtenidos con las actividades A.39, A.40 y A.41.



A.43 La distribución de carga en un conductor en equilibrio es función de su radio de curvatura. En zonas de menor radio de curvatura se concentra más densidad de carga y, por tanto, el campo eléctrico es más intenso. Compruébalo haciendo uso de resultados anteriores y del hecho de que la superficie de un conductor sea una equipotencial. Para ello, puedes considerar un conductor formado por dos esferas de radios R y r respectivamente, unidas tal y como muestra la figura. Particulariza los resultados acerca del campo y la densidad superficial de carga para r=R/4.

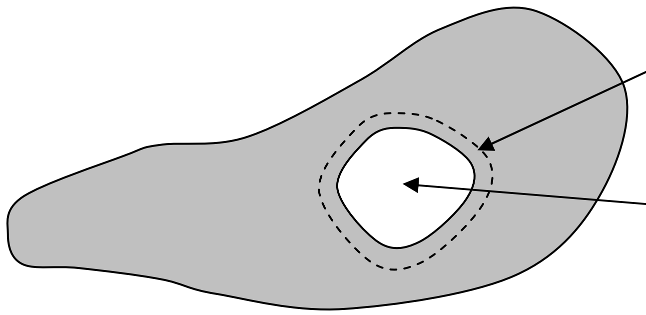


Comentario:

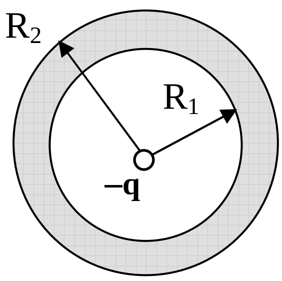
En este conjunto de actividades se tratan algunos aspectos básicos del comportamiento eléctrico de los materiales conductores. Se razona, por reducción al absurdo, que el campo eléctrico en el interior de un conductor (neutro o cargado) en equilibrio electrostático es nulo (A.39-a) y se relaciona este hecho con la jaula de Faraday y la protección electrostática de aparatos ultrasensibles (A.39-b). A continuación, consecuencia de lo anterior, se demuestra que, si un conductor en equilibrio electrostático está cargado, el exceso de carga ha de ubicarse en su superficie (A.40). Posteriormente, pasamos a valorar el campo eléctrico en puntos próximos a la superficie exterior del conductor cargado razonando, primero, que el campo y la superficie del conductor han de ser perpendiculares entre sí para, después, haciendo uso del teorema de Gauss, valorar la magnitud del campo (A.41).

En la actividad A.41, planteamos la posibilidad de contrastar algunos de los resultados anteriores por medio de una simulación y, finalmente, en la siguiente actividad (A.43) justificamos que la distribución de carga en un conductor en equilibrio electrostático es función de su radio de curvatura. En este sentido, es conveniente una representación gráfica correcta y ajustada a aspectos cuantitativos de la distribución de carga en conductores en los que se haya perdido la simetría, ya que la tendencia es a considerar distribuciones uniformemente repartidas como las correspondientes a cuerpos esféricos.

A.44 Si practicamos un hueco en un conductor cargado y en equilibrio, ¿habrá cargas en la superficie interior del conductor? Puedes utilizar, para ayudarte a resolver la actividad, la superficie gaussiana indicada en la figura.



A.45 Consideremos una corteza esférica conductora descargada de pared gruesa de radios R_1 interno y R_2 externo. Introducimos en su centro una carga puntual –q.



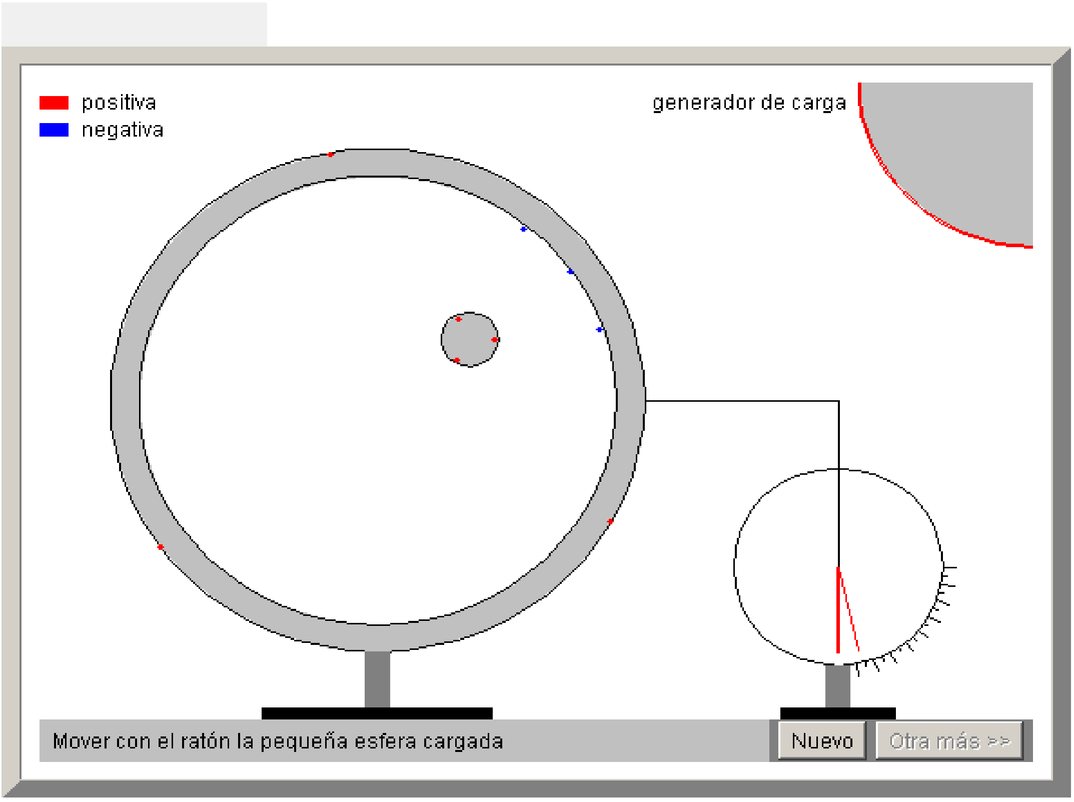
Dibuja la distribución de carga que se induce en la corteza.
Dibuja las líneas de campo, tanto en el interior como en el exterior.
Razona acerca del campo eléctrico en las zonas: $r<R_1$; $R_1 \leq r \leq R_2$ y $r> R_2$
Representa gráficamente los valores del campo en las tres zonas.
En un momento determinado la carga puntual de la actividad anterior cae a la superficie interior de la corteza. Razona lo que sucederá en tal caso.

A.46 El proceso de transferencia de carga de un conductor a otro, fue estudiado por Faraday, utilizando como conductor hueco el recipiente metálico donde guardaba el hielo que empleaba en el laboratorio. En la simulación ‘Cubeta de Faraday’, con el puntero del ratón cogemos una bola que ha sido cargada positivamente poniéndola en contacto con un generador y la introducimos por el orificio situado en la parte superior del conductor hueco, inicialmente descargado.

a) ¿Es coherente lo que se observa con la distribución de carga que has propuesto en la actividad anterior?

Arrastramos la bola con el puntero del ratón hasta que toque con la pared interior de la cubeta. Pulsamos el botón titulado Otra más y la bola se traslada y se pone en contacto de nuevo con el generador electrostático dispuesta para ser introducida a través del orificio del conductor hueco.

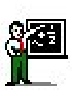
b) ¿Es coherente lo que se observa con tu explicación del último apartado de la actividad anterior? Razona por qué se desvía un ángulo cada vez mayor, la lámina metálica del electroscopio.



Comentario:

El objetivo de estas dos últimas actividades es profundizar más en el comportamiento eléctrico de los conductores. Así, vemos que el exceso de carga de un conductor cargado con un hueco dentro, se sitúa en la superficie exterior del conductor (A. 44). En la actividad A.45 analizamos lo que ocurre si se coloca una carga en el interior de una cavidad. Una correcta aplicación del teorema de Gauss nos hará comprender que en la pared interior de la cavidad se inducirá una carga igual y de signo opuesto al de la carga introducida (inducción total en conductores). La conservación de la carga nos indica que, si el conductor estaba inicialmente descargado, sobre su superficie exterior tendrá que haber una carga igual y de signo opuesto a la existente sobre la pared de la cavidad y, por tanto, igual y del mismo signo que la carga introducida en la cavidad. Posteriormente (A.46), la simulación de la cubeta de Faraday nos permite contrastar nuestras valoraciones, al tiempo que retomamos aspectos previamente abordados como los asociados al electroscopio.

A.47 Explica cómo se comporta un material dieléctrico cuando se le aplica un campo eléctrico. Basa tus explicaciones en la polarización de las moléculas del dieléctrico.



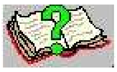
A.48 Considera dos placas metálicas con cargas iguales y opuestas separadas por una pequeña distancia. Introducimos entre ellas una lámina de dieléctrico.

a) Dibuja, de manera aproximada, las líneas de campo eléctrico en las regiones que hay entre placas metálicas.
b) Justifica cualitativamente que el módulo del campo en el interior del dieléctrico se pueda calcular a través de la expresión:

$$E = (\sigma_{\text{libre}} - \sigma_{\text{inducida}}) / \varepsilon_0$$

Comentario:

La introducción de un dieléctrico en una región con un campo eléctrico constante y su correspondiente polarización, resulta adecuada en la medida en que nos introduce al estudio de los condensadores (lección siguiente), de una manera natural, a la vez que establece un sustancial grado de diferenciación con el comportamiento de los conductores. Será en la próxima lección, donde se aborde con más detenimiento el comportamiento eléctrico de los materiales dieléctricos.



A.49 Completa la tabla que sigue. Trata de resumir las principales características, haciendo énfasis en las diferencias que hayas reconocido en la carga de cuerpos conductores y dieléctricos:

Propiedades	**Conductores**	**Dieléctricos**
Carga por frotamiento		
Carga por contacto		
Carga por inducción		
Ubicación de las cargas		