

CAMPO ELÉCTRICO

1. Introducción

Así como la Tierra y la Luna, a pesar de estar a mucha distancia, se atraen, lo mismo sucede con dos carga eléctricas cuando interaccionan entre sí. Hasta ahora para explicar la interacción entre masas o entre cargas eléctricas hemos utilizado el modelo de ‘acción a distancia’. Es decir, una carga ejerce una fuerza sobre otra a través del espacio. En esta lección veremos que existe otra forma complementaria de explicar las interacciones eléctricas a distancia. Veamos los ejemplos que se exponen a continuación.



A.1 ¿Qué interés puede tener, en tu opinión, el estudio del campo eléctrico?

Comentario:

El profesor debe aprovechar esta pregunta para resaltar la influencia de esta parte de la Física en la vida de la humanidad. Así, el profesor puede informar de la relación entre el concepto del campo eléctrico y las ondas electromagnéticas y, en particular, incidir en las aplicaciones tecnológicas de uso diario como la radio, la TV, las comunicaciones (teléfono, telégrafo, fax, correo electrónico.....).

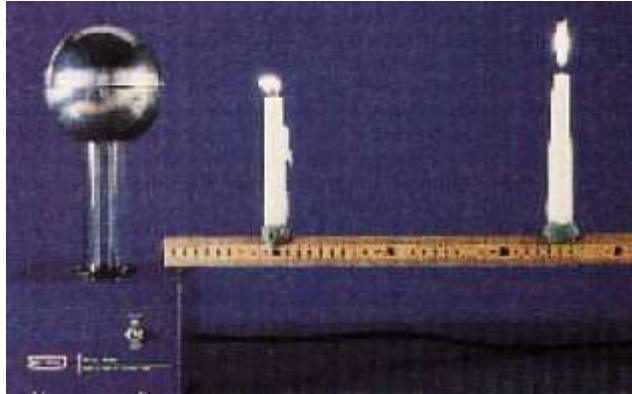
Se puede dar informaciones como, por ejemplo, la siguiente: En 1887 el físico alemán Heinrich Hertz demuestra la existencia de las ondas electromagnéticas, descubiertas teóricamente por James C. Maxwell en 1865. En esta teoría aparece el concepto de ‘velocidad crítica’ para las perturbaciones eléctricas y magnéticas, estableciéndose que la velocidad de estas perturbaciones es igual a la velocidad de la luz. Así mismo se demuestra que la naturaleza de las perturbaciones electromagnéticas y de la luz son esencialmente idénticas. En resumen, sin el concepto de campo eléctrico no es posible comprender, por ejemplo, la naturaleza ondulatoria de la luz.



El profesor también puede incidir en la importancia que ha tenido en la Historia de la Ciencia el concepto de campo y, en particular, para el proceso de unificación de la Física clásica (la acústica, el calor, la óptica, la electricidad y el magnetismo se unifican bajo el concepto de campo durante el siglo XIX llegando este edificio que llamamos Física Clásica a su máximo apogeo).

2. ¿Qué es el concepto de campo eléctrico?

En la figura se muestran las oscilaciones de la llama de una vela al acercarla a una esfera cargada eléctricamente. ¿Qué hace oscilar la llama de la vela? ¿Por qué al acercarse oscila y cuando está alejada no?



A.2 La supernova 1987A estalló hace unos 163.000 años; los campos eléctricos originados por el brusco movimiento de cargas en la estrella y sus alrededores fueron detectados en la Tierra el 23 de febrero de 1987.

La idea de que existe una fuerza eléctrica entre las cargas de la supernova y las cargas de los detectores en la superficie terrestre, y que dicha fuerza no sólo depende de la separación entre cargas, sino también del retraso en la detección entre las cargas emisoras y receptoras, implica entre otras cosas una ley de fuerza con demora de tiempo incluida y que además depende de la distancia entre los cuerpos que interactúan, por lo que es difícil de expresar y manejar. ¿Qué nuevas preguntas podemos plantearnos en el estudio de este tema?

Comentario:

Se trata de un intento para que los alumnos no sólo participen en la selección de los objetivos a cubrir, sino que también puedan adquirir una concepción preliminar de la tarea. Es casi seguro que lo primero que plantearán los estudiantes serán preguntas como ¿qué es el campo eléctrico?, ¿para qué sirve?, ¿cómo saber si hay un campo eléctrico en un espacio determinado?...etc. Dentro de este apartado debe quedar claro el problema principal o estructurante que se quiere resolver y de dónde sale. En el capítulo anterior se ha resuelto el problema de las interacciones eléctricas que se producen entre cargas o cuerpos cargados, es decir, se ha resuelto cómo se atraen o repelen los objetos en los fenómenos eléctricos y para ello se ha introducido el concepto de carga eléctrica y se han explicado cualitativa y cuantitativamente estas interacciones.

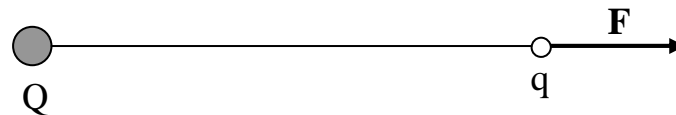


En cualquier caso, todavía está por responder la pregunta : ¿Por qué decimos que la electricidad es energía almacenada o potencial? Esta pregunta, que surge en la vida diaria continuamente cuando se utiliza un enchufe de corriente eléctrica, solamente podrá explicarse mediante la introducción del concepto de potencial

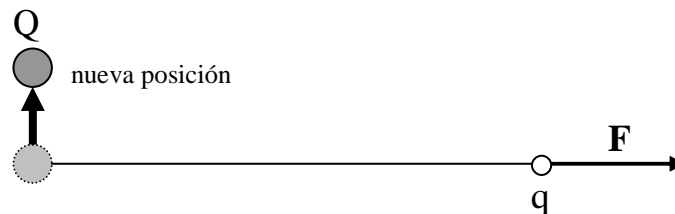
eléctrico, (energía potencial por unidad de carga), en un contexto de campo eléctrico.



A.3 Una carga Q ejerce una fuerza sobre una carga muy pequeña situada a una distancia de 9 m.



Se desplaza la carga Q a una posición ligeramente superior:



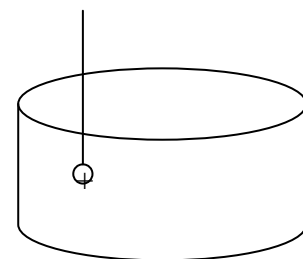
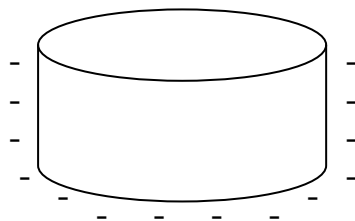
Justifica razonadamente por qué en el momento de llegar la carga Q a su nueva posición la fuerza sobre la carga de prueba no se ha modificado.

Sugerencia: Recuerda que la teoría de la relatividad especial predice que nada puede moverse más rápido que la velocidad de la luz.

Si el problema principal que nos planteamos en este tema es la explicación de cómo se interaccionan las cargas entre sí y tratamos de buscar una respuesta que vaya más allá de la simple descripción de las fuerzas eléctricas, convendrá imaginar que entre las cargas que interaccionan hay algo más que el simple vacío espacial. Veamos algunos ejemplos más cuya explicación implica realizar la hipótesis de ‘espacios perturbados’ alrededor de la carga eléctrica o de los cuerpos cargados.



A.4 Consideremos una caja cilíndrica negativamente cargada (figura izquierda). A continuación se introduce una pequeña esfera colgada de un hilo y cargada positivamente (se puede considerar que es una carga puntual positiva) en el interior del cilindro (figura de la derecha)



¿Se moverá la carga positiva?



A.5 Durante una fuerte tormenta un camionero se encuentra refugiado en el interior de su camión, que lo ha estacionado en el aparcamiento de un bar de carretera hasta que pase la tormenta. Un rayo cayó justo encima del camión sin que el camionero notara nada, pero los gritos que dieron las personas que se encontraban en el bar al observar el suceso, hicieron que el camionero se decidiera a salir del camión. Al salir, una vez abierta la puerta por dentro, apoyó la mano en la parte exterior del camión quedando al instante electrocutado. ¿Cómo explicarías este suceso real de acuerdo con lo que sabemos hasta ahora?

Comentario:

Se pueden utilizar las cuestiones A.4 y A.5 como ejemplos de problemas electrostáticos que la teoría de acción a distancia sólo resuelve de forma complicada integrando los diferenciales de fuerza y viendo que el resultado en el interior del cilindro o del camión es cero. Los estudiantes, en general, resuelven erróneamente la cuestión A.4 al interpretar que la carga puntual se mueve. Razonan como si cada pared del cilindro fuera una carga puntual y aplican la ley de Coulomb, indicando que la carga puntual será atraída por la pared más cercana.



En el caso de la cuestión A.5, la descarga del camionero puede ser explicada por los estudiantes (paso de carga a través de un conductor), pero no explican que no le sucede nada cuando está dentro del camión. Ambas cuestiones, tienen una fácil explicación dentro de la teoría de campo eléctrico como veremos más adelante en esta lección. Aquí sólo pretendemos cuestionar el modelo de fuerzas a distancia para algunos ejemplos y hacer surgir en los estudiantes la necesidad de plantearse otro modelo complementario.





Ahora estamos en situación de definir el campo eléctrico como una zona perturbada que se sitúa alrededor de las cargas y cuerpos cargados y en la cual se producen interacciones eléctricas. Sin embargo, en ciencia es necesario medir el concepto que se define.

Así pues, nuestra siguiente tarea será medir el campo eléctrico producido por las cargas eléctricas. Como siempre, empezaremos por una situación muy simple que podamos acometer sin problemas. En este caso, la medición del campo eléctrico producido por una carga puntual.

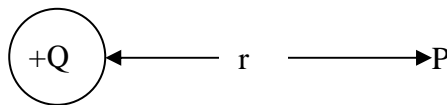
3. ¿Cómo calcular el campo eléctrico producido por una carga puntual?

Vamos a tratar de introducir una magnitud operativa que nos defina el campo eléctrico producido por una carga puntual.

 **A.6** ¿De qué forma podría determinarse si el campo eléctrico en una región del espacio situada alrededor de una carga eléctrica puntual es débil o intenso? Introducir una definición operativa de campo eléctrico.

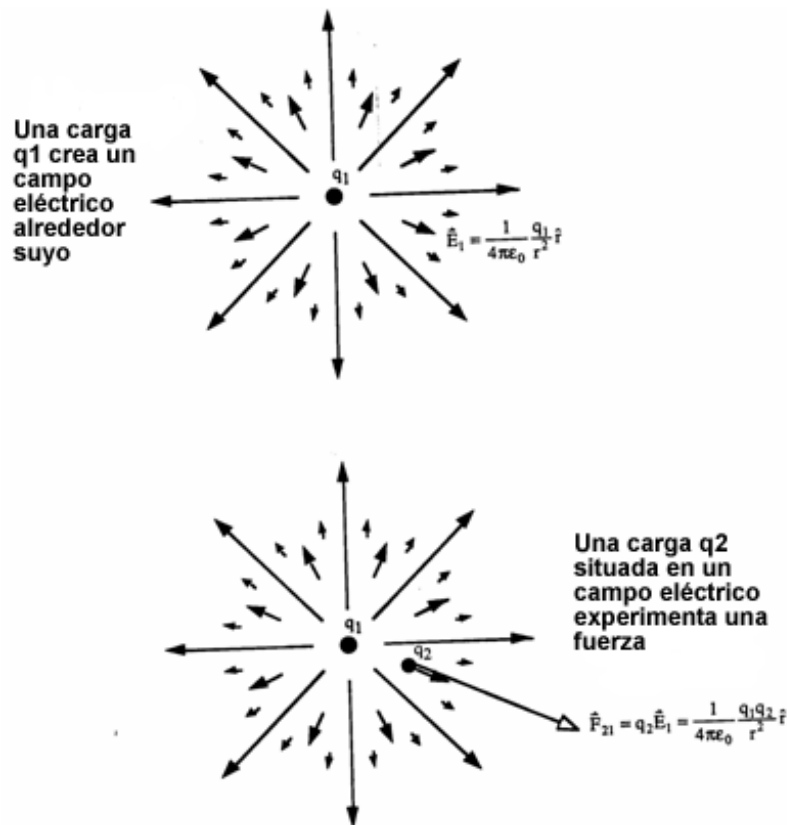
 **A.7** Supongamos una carga puntual $+Q$ situada en una zona del espacio, ¿cómo calcular el campo que produce en un punto P de esa zona?

A.8 Dibuja y calcula la fuerza que la carga $+Q$ ha ejercido sobre una carga muy pequeña $+q$ situada a una distancia r , en el punto P. ¿Cuál será el campo eléctrico producido por $+Q$ en ese punto?



Una vez contestadas las cuestiones anteriores, observa con detenimiento el dibujo adjunto y saca tus propias conclusiones:

En dicho dibujo se representa, a escala, el campo eléctrico creado por una carga $+q_1$ en diferentes puntos del espacio y la fuerza eléctrica que $+q_1$ ejercería sobre una carga $+q_2$ colocada en dichos puntos.



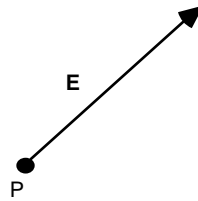


A.9 Si en la pregunta anterior la carga hubiera sido $-q$, dibuja el campo y la fuerza en el punto P.

A.10 En un punto del espacio se coloca: a) una carga de 4 C viéndose sometida a una fuerza de 10 N en la dirección y sentido de la figura. b) retirando dicha carga se coloca otra de -2 C actuando sobre ella una fuerza de 5 N en la dirección y sentido indicados. Calcular, en cada caso, el valor del campo eléctrico y dibujar el vector correspondiente.



A.11 Dibujar las fuerzas F_1 y F_2 a que se verían sometidas, respectivamente, las cargas de 2 C y -3 C en el punto P de la figura para el que se ha indicado el campo eléctrico E .



A.12 En un punto P situado sobre el eje de las X se coloca una carga de 10^{-4} C que resulta estar sometida a una fuerza de 0,02 N dirigida hacia el origen de coordenadas. Especificar el módulo, dirección y sentido del vector campo eléctrico en el punto P.

Comentario:

En la A.6 se plantea la necesidad de introducir una magnitud que mida la intensidad del campo eléctrico. Aquí será necesario que los estudiantes planteen las diferentes variables que intervienen en el problema (carga creadora del campo y no influencia de la carga 'prueba'). El campo será intenso si la fuerza aplicada sobre una carga prueba es grande y débil si es pequeña. Pero como esa fuerza depende también del valor de la carga testigo debemos adoptar para la carga testigo un valor dado, pues sino no podremos comparar los resultados obtenidos en diferentes experimentos. Todo esto nos llevará a definir la intensidad del campo E en un punto como la fuerza a que está sometida la unidad de carga positiva en dicho punto: $E = F/q$.



En A.7-A.12 se dan oportunidades para que los estudiantes manejen las diferentes variables que intervienen en el proceso y se llegue a establecer que la intensidad de campo en un punto sólo depende de la distancia de ese punto a la carga creadora del campo y de la cantidad de la carga Q creadora. Este planteamiento cualitativo evitará, como sucede frecuentemente, que los alumnos identifiquen las magnitudes \mathbf{E} y \mathbf{F} debido a una utilización puramente operativa de la definición.



Las actividades A.10, A.11 y A.12 son aplicaciones de la definición operativa de intensidad de campo, en las que se insiste en los dibujos para dejar claro el carácter vectorial de la magnitud.

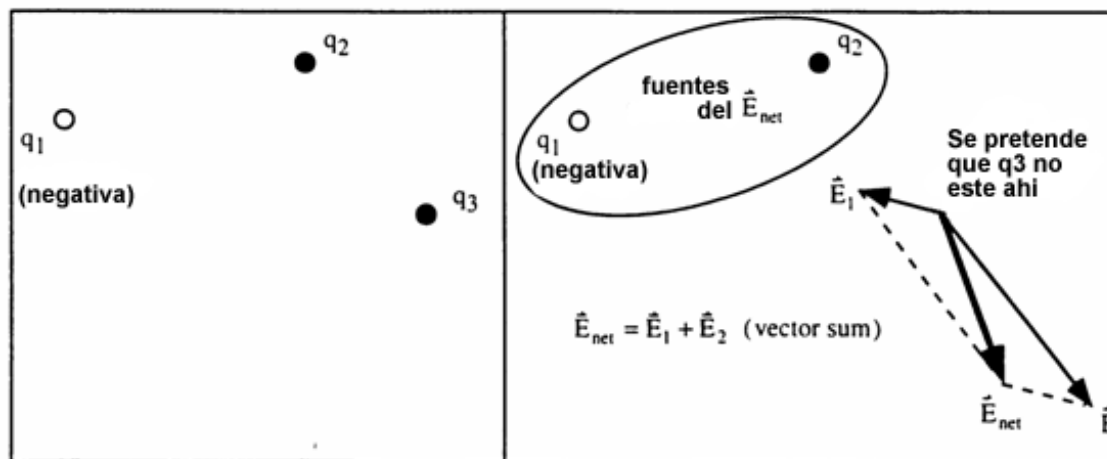


En la A.10 se ve la necesidad de adoptar un criterio respecto a la carga testigo, pues si no el vector \mathbf{E} tendría el sentido según el signo de la misma. Se puede utilizar como actividad de evaluación.

En la A.11 los alumnos suelen incurrir en el error de dar distintos valores a la intensidad de campo. Sin embargo en la actividad se llega a ver claramente que el valor de la intensidad de campo, en un punto, no depende de la carga utilizada como testigo. La actividad siguiente, A.12, trata de profundizar en la comprensión de la magnitud intensidad de campo.



A.13 ¿Qué te sugiere el hecho natural de que una carga cree en un punto del espacio el mismo campo eléctrico, ya sea cuando sólo está ella que cuando hay otras cargas ‘vecinas’?. En el cuadro de abajo te indicamos un breve resumen del principio de superposición de fuerzas y campos eléctricos.

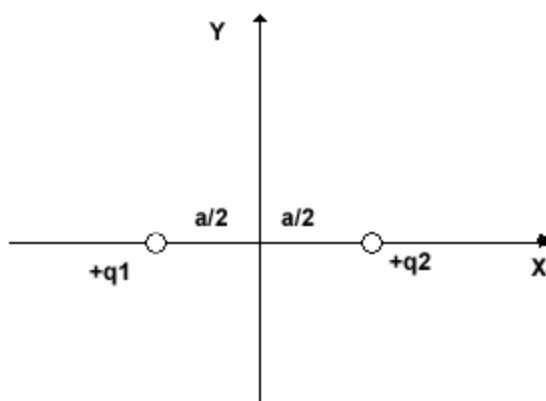


Vamos a aplicar el principio de superposición a varios ejemplos.



A.14 Calcula el campo eléctrico creado por un dipolo en un punto del espacio

A.15 Calcula el campo eléctrico creado por el dipolo de la figura, en puntos del eje Y.



Comentario:

Se trata de esbozar el problema de la determinación de la intensidad de campo eléctrico en el caso de tener más de una carga puntual. Los alumnos no tienen dificultad en proponer que el campo resultante debe ser la suma de los campos eléctricos producidos por cada una de las cargas consideradas. Sin embargo es preciso resaltar el carácter vectorial de esta suma que no siempre es tenido en cuenta. Precisamente las actividades A.14 y A.15 van dirigidas a desarrollar algunos casos concretos, donde se debe aplicar el principio anterior.

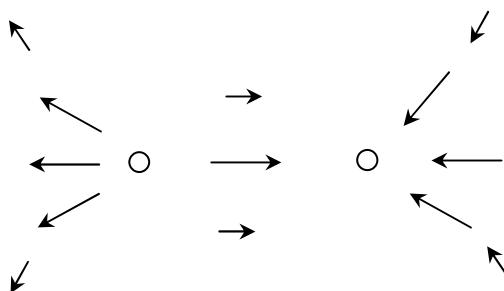


Hasta este punto hemos definido el campo eléctrico y hemos visto la manera de calcularlo para el caso de cargas puntuales. Como en general, el campo varía con la distancia a las fuentes (las cargas), para cada punto del espacio encontraremos un valor diferente en módulo dirección y sentido del vector campo, por lo que representar este vector en cada punto puede ser una tarea ardua. Con objeto de adquirir una visión más global del campo en todo el espacio que rodea a una distribución de carga, nos planteamos la siguiente cuestión:

4. ¿Existe otra manera de visualizar gráficamente el campo eléctrico?



A.16 Si para una determinada distribución de carga se conocen los valores del campo eléctrico en los puntos del espacio señalados en la figura, dibuja las líneas de campo correspondientes al sistema.



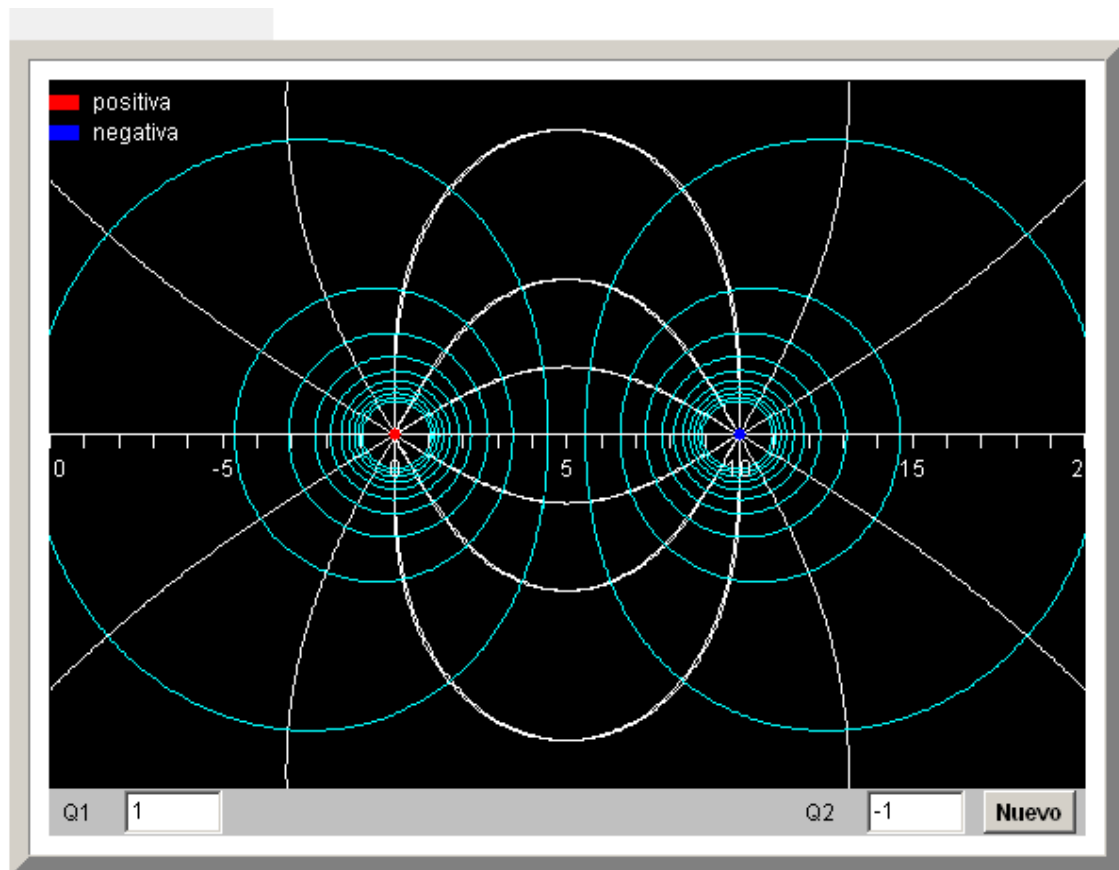
A.17 ¿Cuál es el signo de las cargas puntuales de la actividad anterior?



A.18 Basándote en la actividad anterior dibuja el mapa de líneas de campo para las siguientes configuraciones de dos cargas:

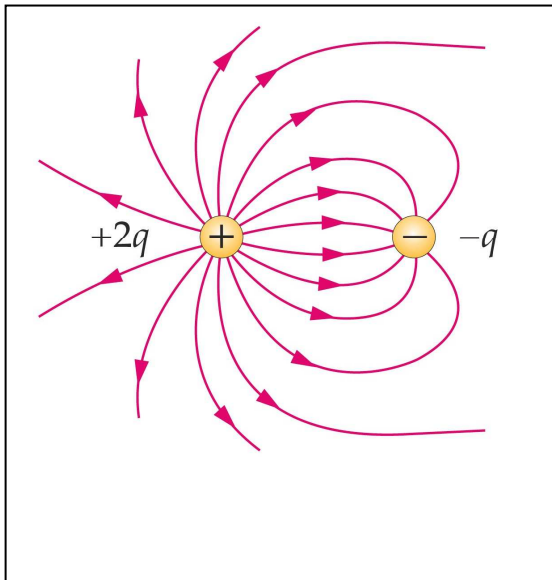
- Dos cargas iguales y del mismo signo
- Dos cargas iguales y de distinto signo
- Dos cargas distintas y del mismo signo
- Dos cargas distintas y de distinto signo

Una vez realizado los dibujos abre el fislet “Campo eléctrico de un sistema de dos cargas” y comprueba tus resultados con la simulación.

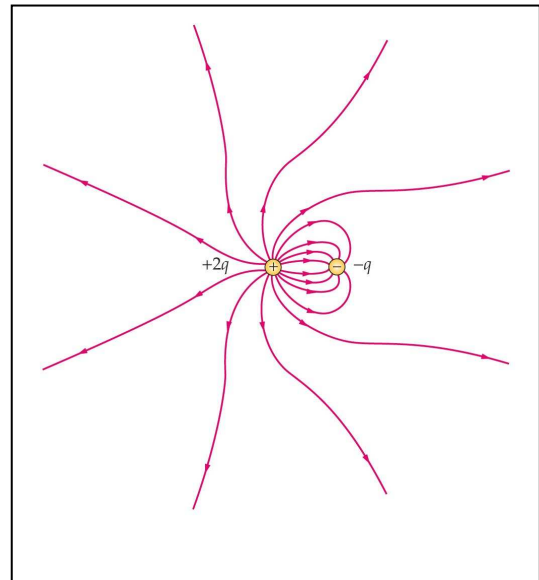


A.19 Basándote en las actividades anteriores, dibuja el diagrama de líneas de campo de una carga positiva, imaginando para ello que alejas la carga negativa hasta el infinito. En caso necesario consulta tu libro de texto.

A.20 Cualquier distribución de carga, vista desde *muy lejos*, se percibe como una carga puntual de valor igual a la carga neta del sistema. ¿Cómo será el diagrama de líneas de campo de cualquier sistema visto desde el infinito? Analiza el caso que se presenta en el sistema de las figuras



Líneas de campo eléctrico correspondientes a un sistema formado por una carga puntual '+2q' y otra '-q'



Líneas a distancias grandes de las cargas

Comentario:

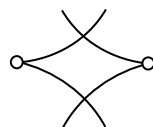
En A.16 y A.17 suponemos que los estudiantes ya conocen de cursos anteriores la definición de líneas de campo, aunque siempre es conveniente recordarla o que la repasen. Estas actividades tienen como objetivo ese recordatorio y que los propios estudiantes dibujen las líneas; no sólo las vean en el libro de texto. Otro ejercicio con el mismo objetivo pero ayudado por una simulación es el de A.18



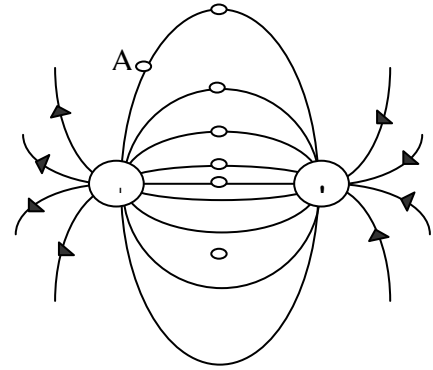
En A.19 y A.20 se trata de que los estudiantes dibujen líneas de campo y especulen sobre las figuras de las líneas de campo para distribuciones muy alejadas.



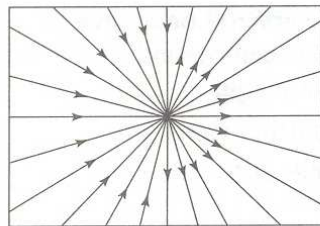
A.21 ¿Crees posible que la figura represente una parte de un diagrama de líneas de campo de un sistema de cargas? Razónalo.



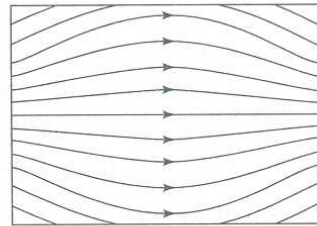
A.22 a) Dibuja el vector campo eléctrico en cada uno de los puntos señalados en la figura. b) ¿Qué trayectoria seguirá una carga puntual $-q$ liberada en el punto A de la figura?



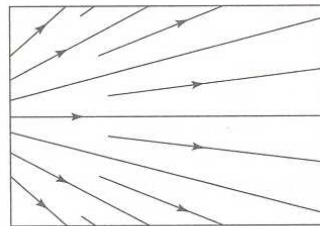
A.23 Los dibujos representan diferentes líneas de campo. Teniendo en cuenta que en la región del dibujo no existen cargas, indicar y justificar cuáles de los dibujos representan líneas de un campo electrostático.



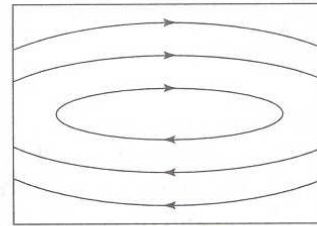
(a)



(b)



(c)



(d)



A.24 Completa la siguiente tabla para distribuciones discretas de carga:

	Características de las líneas de campo
Dirección del campo	
Sentido del campo	
Módulo del campo	
Unicidad del campo	
Signo de la carga	
Simetría cerca de la carga puntual	
Simetría a grandes distancias del sistema	

Comentario:

Las actividades A.20 y A.21 son conocidas en la investigación didáctica como actividades que permiten al profesorado conocer el nivel de aprendizaje de los estudiantes del concepto de líneas de campo. Pueden servir a los estudiantes para conocer su progreso en el aprendizaje.



La actividad A.22, A.23 y A.24 son actividades de retroalimentación y resumen.

5. ¿Qué sucede cuando las distribuciones de carga son continuas?



La imagen de TV es producida por un haz de electrones que se acelera en un tubo por medio de un campo eléctrico. La fotocopiadora y las impresoras de inyección de tinta requieren un campo eléctrico bien sintonizado. En todos los casos el campo eléctrico se debe a una distribución de carga que se ubica sobre líneas, superficies o volúmenes, más que a unas cargas puntuales aisladas. Por supuesto que la carga es una propiedad de los electrones y de los núcleos del material, pero su cantidad es tan grande que el medio se puede considerar continuo. Estas distribuciones continuas se pueden producir en una longitud (una dimensión), en una superficie (dos dimensiones) o en un volumen (tres dimensiones). En cada caso la distribución continua se expresa:

a) Carga por unidad de longitud (C/m):

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

b) Carga por unidad de superficie (C/m²):

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}$$

c) Carga por unidad de volumen (C/m³):

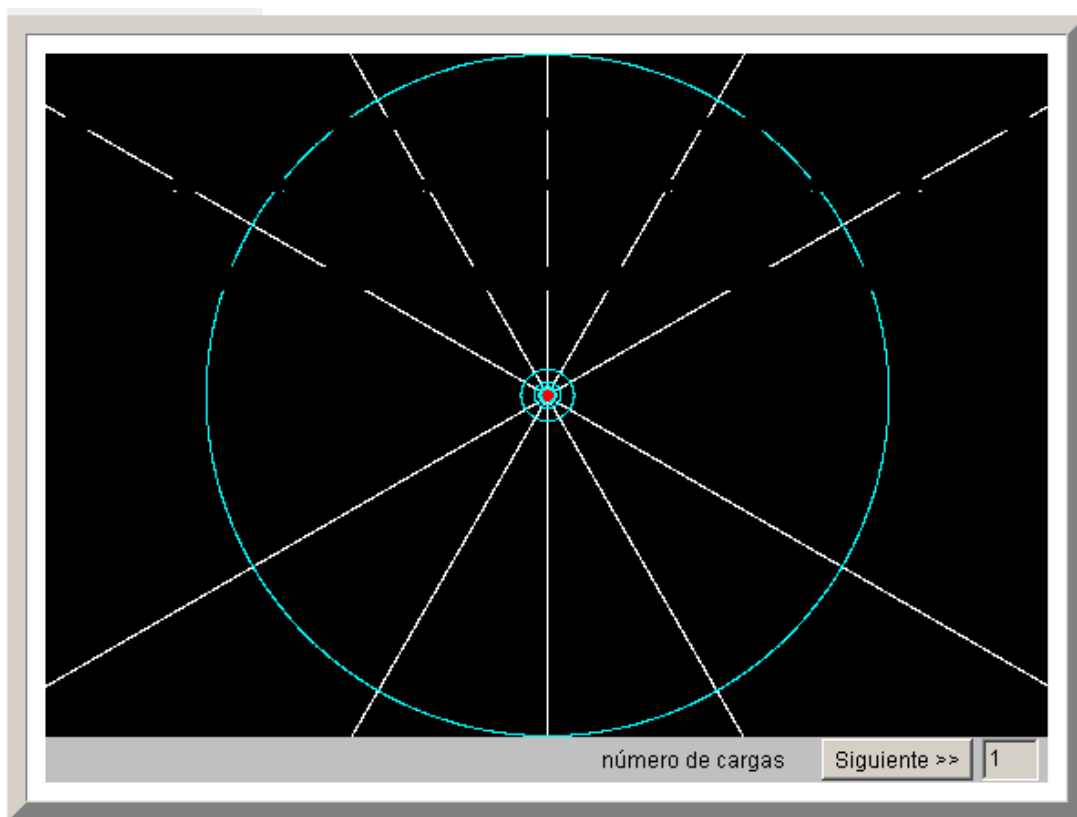
$$\rho = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

Antes de pasar al cálculo del campo eléctrico creado por distribuciones continuas de carga, es conveniente analizar ciertos aspectos cualitativos del campo y de su representación mediante líneas de campo para algunas distribuciones características. Consulta un libro de texto, analiza las líneas de campo eléctrico dibujadas para las siguientes configuraciones y vete rellenando la tabla de la actividad A.26.

- Corteza esférica de radio R uniformemente cargada
- Esfera maciza de radio R uniformemente cargada



A.25 Abre el fislet “Campo producido por un conjunto de cargas iguales e igualmente espaciadas” en “línea de cargas”. Se presenta el campo eléctrico producido por dos, tres ... hasta 8 cargas iguales y alineadas, ¿Qué forma tienen las líneas de campo? ¿Es coherente con lo que hemos visto en las actividades anteriores?. Dibuja cómo serían las líneas de campo de un “hilo conductor de longitud L uniformemente cargado”, y comprueba tu resultado con el que aparece en un libro de texto



Comentario:

Los estudiantes consultan el libro de texto y analizan diferentes configuraciones de líneas de campo. Los estudiantes tienen tendencia a reducir todo el problema a una carga puntual y por ello, se debe insistir en que dependiendo del sistema de cargas que genera el campo las configuraciones son diferentes. Los estudiantes deben trabajar ellos mismos estos sistemas no limitarse a escuchar o leer de forma pasiva. El profesorado debe preparar a los estudiantes para que sean capaces de realizar por sí mismos la tabla de la actividad A.26



A.26 Completa la siguiente tabla para distribuciones continuas de carga:

	Características de las líneas de campo
Simetría cerca de la distribución continua	
Simetría a distancias intermedias	
Simetría a grandes distancias del sistema	

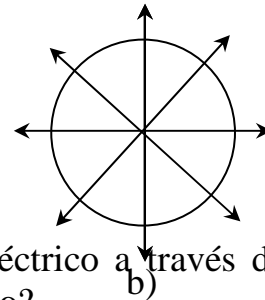
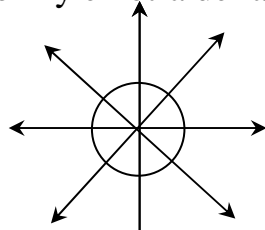
Llegados a este punto ya disponemos de importante información cualitativa sobre los campos eléctricos creados por algunas distribuciones continuas de carga. Nuestro próximo objetivo consiste en buscar caminos para obtener las expresiones matemáticas correspondientes a dichos campos. Encontraremos dos, y tendremos que analizar cuál es el adecuado en cada caso.

6. ¿Cómo obtener la expresión matemática del campo eléctrico producido por una distribución continua de carga? Flujo eléctrico

Teniendo en cuenta que el campo eléctrico es producido por las cargas eléctricas, deberemos buscar una relación entre ambas magnitudes. Una manera de hacerlo será utilizar el concepto de flujo eléctrico a través de una superficie. De forma cualitativa, podemos interpretar el flujo como ‘la cantidad neta de líneas de campo que atraviesa esa superficie’. Si ésta es cerrada, tendrá relación con el número de líneas de campo que entran o salen del volumen definido por la superficie en cuestión. Vayamos despacio, la cuestión no es difícil pero exige papel y lápiz y trabajo con tus compañeros.

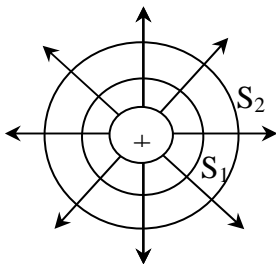


A.27 Imaginemos la misma carga puntual Q encerrada en una esfera de radio R y en otra de radio $2R$.



- 1) ¿Cuál es el número de líneas de campo o flujo eléctrico a través de cada esfera? ¿Cambia el flujo a través de las esferas? ¿Cuánto?
- 2) ¿Cambia la magnitud del campo eléctrico en los puntos de una y otra superficie esférica? ¿Cuánto?
- 3) ¿Cambia el área de las esferas consideradas? ¿Cuánto?
- 4) ¿Se puede establecer alguna relación entre el flujo y el campo eléctrico?

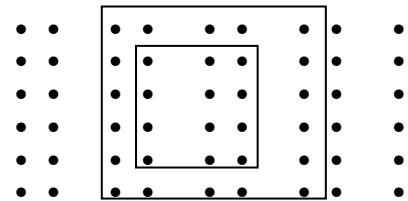
A.28 A cada punto del espacio le corresponde un valor del campo eléctrico, por tanto, por cada punto pasa una línea de campo. Sin embargo, se obtiene una adecuada representación del campo si se trazan un número finito N de líneas de campo; por ejemplo, ocho en la figura.



- a) ¿Cuántas líneas de campo pasan por la superficie esférica S_1 de radio r_1 y por la superficie S_2 de radio r_2 ?
- b) ¿Cuántas líneas de campo por unidad de superficie pasan por S_1 y S_2 ?
- c) ¿Cuánto vale el campo eléctrico sobre S_1 y S_2 ?
- d) ¿Qué podemos concluir de lo anterior?

A.29 Consideremos ahora un campo eléctrico uniforme perpendicular al papel y saliente, y dos superficies abiertas cuadradas, una de lado l_a y otra de lado $l_b=2l_a$:

- 1) ¿Cambia el flujo a través de ambas superficies? ¿Cuánto?
- 2) ¿Cuánto varía el área?
- 3) ¿Cómo será la relación cuantitativa entre el flujo y el área de la superficie a través de la cual se calcula?



Comentario:

Los estudiantes suelen tener dificultades a la hora de manejar las variables que intervienen en el concepto de flujo eléctrico: superficie ‘ad hoc’, líneas de campo, área de superficie y su relación con la intensidad de campo eléctrico. En las A.27, A.28 y A.29 se les proporciona oportunidades para manejar esas variables y construir una relación cualitativa entre la densidad de líneas de campo que atraviesa una superficie y el campo eléctrico en dicha superficie. Se llegará a



establecer la relación en la que el flujo eléctrico, por unidad de superficie, es proporcional a la magnitud del campo eléctrico.

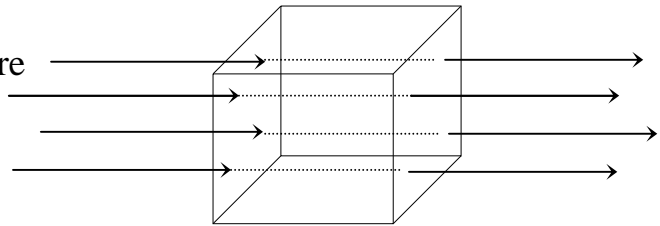


A.30 1) Imaginemos un cubo ubicado en una región en la que existe un campo eléctrico uniforme.

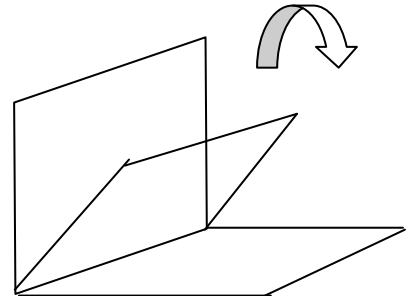
a) ¿A través de que cara del cubo se da un flujo máximo? ¿Cuál es en este caso la orientación entre la superficie y el campo?

b) ¿A través de que cara del cubo se da un flujo nulo? ¿Cuál es en este caso la orientación entre la superficie y el campo?

c) ¿Aprecias alguna diferencia entre la cara derecha y la izquierda?



2) Si fuéramos girando la cara izquierda del cubo, como si fueran las páginas de un libro, desde su posición inicial perpendicular al campo hasta hacerla coincidir con la base del cubo ¿qué le ocurriría al flujo a través de esa cara?

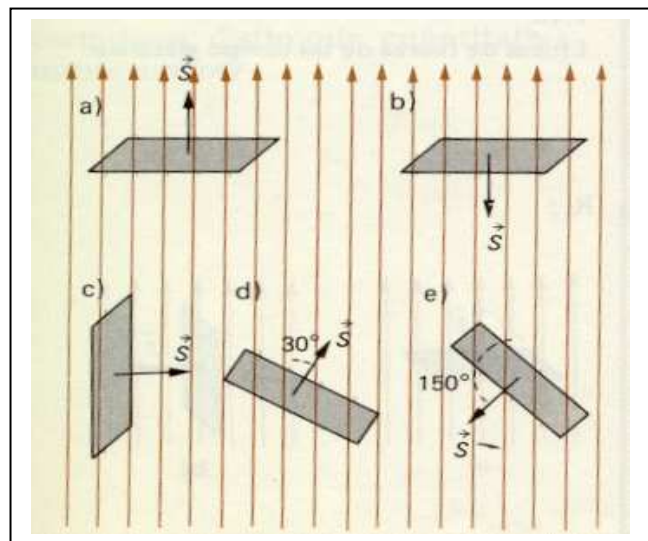


3) La orientación de una superficie se puede indicar por medio de un vector unitario perpendicular a la misma y, por convenio, saliente si aquella es cerrada. ¿Qué función trigonométrica habrá que incluir en la definición de flujo para recoger la influencia que sobre él tiene la orientación relativa entre el campo y la superficie?



A.31 En el dibujo se representan las líneas de campo de un campo eléctrico uniforme. Se han dibujado superficies matemáticas imaginarias. Calcular el flujo de campo eléctrico en cada una de ellas.

Suponer que la superficie es de 2 m^2 y el campo eléctrico de 4 N/C .

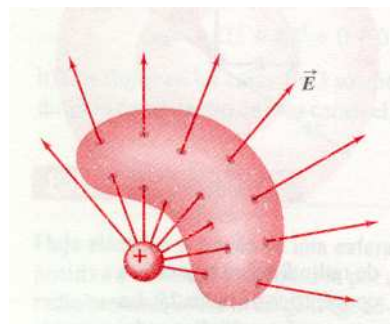
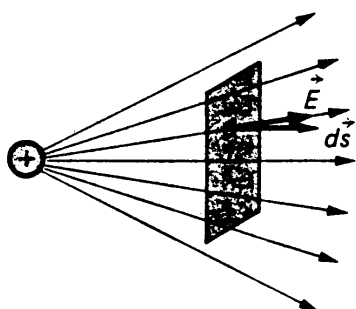




A.32 Completa la siguiente tabla:

Factores de los que depende el flujo	Tipo de dependencia
Magnitud del campo	
Magnitud del área	
Orientación relativa campo/superficie	

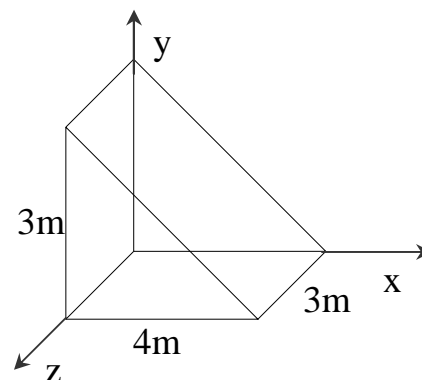
A. 33 ¿Qué sucede cuando el campo no es constante a lo largo de la superficie considerada?



Definición general de flujo eléctrico: $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$

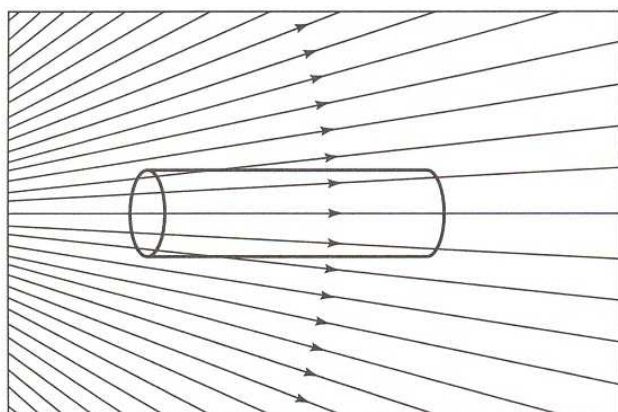
A.34 La superficie cerrada de la figura se encuentra inmersa en una región en la que existe un campo eléctrico uniforme $\vec{E} = 600\vec{u}_x \text{ N/C}$.

- Obtener el flujo eléctrico a través de cada cara y el flujo que atraviesa toda la superficie.
- ¿Podríamos hacer alguna valoración acerca de la carga encerrada por esa superficie?



A.35 Un cilindro de material aislante se coloca en un campo eléctrico externo tal y como indica el dibujo. Indicar si el flujo que atraviesa el cilindro es:

- positivo; b) negativo; c) cero. Justificar la respuesta.



Comentario:

Estas actividades continúan el trabajo de las anteriores y tratan de dar una definición general de flujo, para cualquier superficie, en relación a la dirección del campo eléctrico y para cualquier campo eléctrico (no sólo para el uniforme). Los estudiantes suelen tener dificultades con la comprensión del producto escalar que nos operativiza las direcciones de cada magnitud implicada. En las A.33 y A.34 se trata de evaluar el aprendizaje logrado en esta sección.

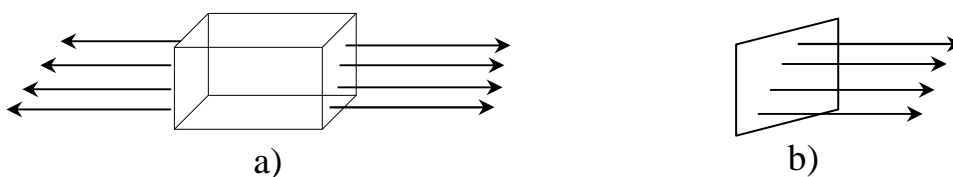


Ya hemos comprobado de manera cualitativa que el flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada está relacionado con el campo eléctrico en esa superficie. Nos planteamos ahora la siguiente cuestión:

7. ¿Existe alguna relación cuantitativa entre el flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada con la carga contenida en el volumen delimitado por ella? Ley de Gauss

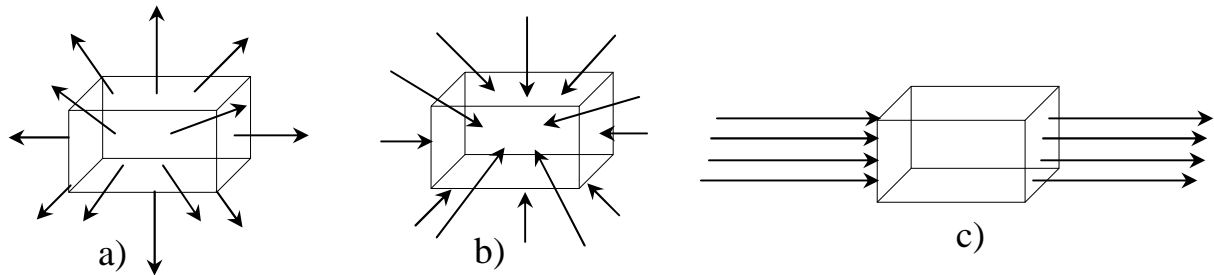
Comprobaremos que la respuesta es afirmativa, y veremos cómo estas ideas nos abren una interesante vía para el cálculo de campos eléctricos.

A.36 1) Imagina las siguientes situaciones para el campo eléctrico en una determinada región (las superficies de la figura no poseen carga, no son reales, se han dibujado a propósito para poder analizar las líneas de campo):



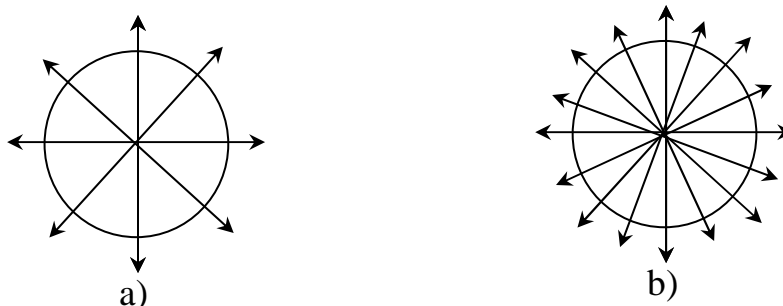
¿Puedes sugerir alguna distribución de carga que de lugar a estas situaciones?
 ¿El flujo a través de cuál de las dos superficies imaginarias, te da alguna información acerca de la distribución de carga que crea el campo en cuestión?

2) Compara las líneas de campo que atraviesan las tres cajas de la figura y razona cuál contiene carga positiva, negativa o nula.



3) Si adoptamos el convenio de asignar signo (+) al flujo saliente y signo (-) al entrante ¿cuál será el signo del flujo a través de una superficie cerrada cuando en su interior hay una carga neta positiva?, ¿y si es negativa?

A.37 Si la carga puntual encerrada en la esfera de la figura a) es Q :



1) ¿Cuál será la carga encerrada en la esfera del mismo radio de la figura b)? Razónalo.

2) ¿Cuál es la relación entre los flujos que atraviesan las dos esferas? Razónalo.

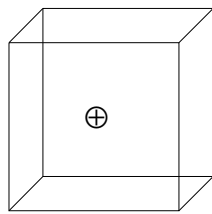
3) ¿Cuál será la relación entre el flujo y la magnitud del campo? Razónalo.



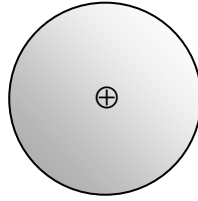
A.38 Obtener el flujo del campo eléctrico creado por una carga puntual positiva (a través de las siguientes superficies cerradas), siguiendo las instrucciones que se indican a continuación:

1) Realiza un esquema de las líneas de campo.

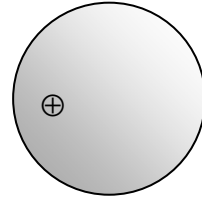
2) Para obtener el flujo a través de una superficie cerrada por medio de su definición integral $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$ tendrás que ser capaz de valorar $\vec{E} \cdot d\vec{S}$ para todos los puntos de la superficie elegida. Razona si las superficies sugeridas a continuación nos permiten calcular el flujo a su través utilizando la definición integral. En caso afirmativo resuélvelo.



a)



b)



c)

3) Si duplicáramos el radio de la esfera utilizada ¿cambiaría el resultado?

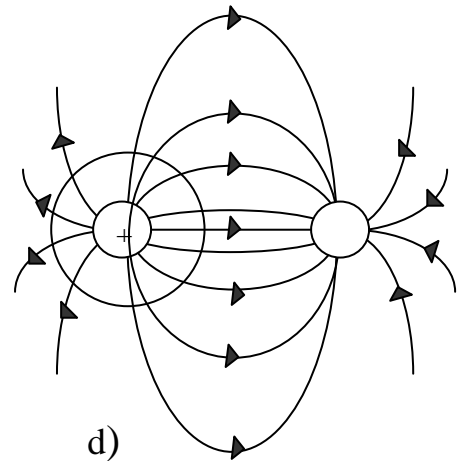
4) Si la carga fuera negativa ¿cambiaría el resultado?

5) Si la superficie cerrada elegida, que encierra a la carga Q , tuviera forma arbitraria ¿sería diferente el valor del flujo?

6) Si el flujo es independiente de la superficie cerrada elegida que engloba a la carga ¿por qué hemos considerado inapropiadas alguna de las superficies propuestas en el apartado 2 de esta actividad?

7) Si además de la carga interna $+Q$, existe en el entorno de la superficie “matemática” o “gaussiana” otra carga externa, por ejemplo $-Q$ ¿cambiaría el resultado? (Ver figura d)

8) Cuando calculamos el flujo a través de una superficie cerrada por medio de su definición integral ¿qué campo eléctrico debemos considerar, el total producido por las cargas internas y las externas, o el debido únicamente a las cargas internas?



d)

Comentario:

Los estudiantes deben haber trabajado y aprendido la sección anterior de flujo eléctrico para poder analizar las actividades de esta sección. Estas actividades proporcionan evidencias de que la carga contenida en una superficie cerrada, el flujo de las líneas de campo y el campo eléctrico en la superficie generado por todo el universo de cargas interiores y exteriores están relacionados. Las A.36 y A.37 son cualitativas y la A.38 trata de que los estudiantes construyan la relación. Los estudiantes suelen tener dificultades a la hora de entender que la superficie es imaginaria y que la facilidad de calcular el flujo depende del tipo de superficie elegida, aunque la relación es la misma (apartado 2 de la A.38).



A continuación el profesor/a introduce la ley de Gauss.



Podemos ahora concretar las valoraciones realizadas en esta actividad y expresarlas en forma matemática mediante la ley de Gauss:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$$

Esta ley nos representa de manera cuantitativa lo que a lo largo de las actividades previas hemos intuido de manera cualitativa: el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada está relacionado con la carga eléctrica que esa superficie encierra.

Cuando conozcamos el campo total existente en una determinada región, si las condiciones de simetría lo permiten, podremos obtener la carga encerrada por una superficie gaussiana, aunque el campo sea también consecuencia de cierta carga externa.

Por otro lado, si lo que conocemos es la distribución de carga, imaginando una superficie gaussiana adecuada y si las condiciones de simetría nos lo permiten, podremos obtener el campo eléctrico originado por dicha distribución.



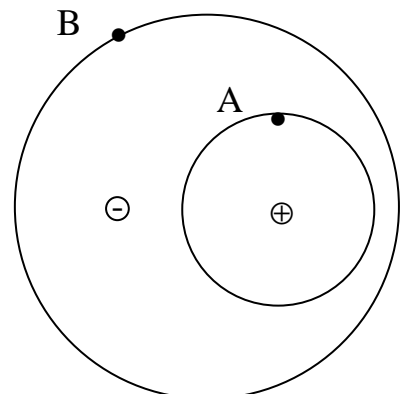
A.39 Cuando el tiempo es seco el campo eléctrico cerca de la superficie terrestre es de unos 100N/C y apunta hacia el centro. Estima la carga neta de la superficie terrestre. $R_t=6378\text{km}$.



A.40 Consideremos el sistema de dos cargas Q puntuales iguales y de signo contrario de la figura:

a) Un estudiante utiliza la ley de Gauss y concluye que el campo eléctrico en el punto A es $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_1^2}$, siendo r_1 el radio de la superficie esférica que centrada en $+Q$ pasa por A. ¿Estarías de acuerdo con él? Razónalo.

b) Argumenta si compartes o no la siguiente afirmación: “Basándonos en la ley de Gauss comprobamos que el campo eléctrico en el punto B de la figura es nulo”.



Comentario:

Estas actividades proporcionan a los estudiantes oportunidades de contrastar su aprendizaje. En concreto la actividad A.40 incide en: a) que el



campo es generado por todo el universo de cargas del espacio y no sólo por las cargas interiores a la superficie Gaussiana;

b) que el flujo eléctrico y el campo eléctrico son dos magnitudes relacionadas pero distintas.



Estamos ya en condiciones de hacer uso de los conocimientos adquiridos para obtener la expresión matemática del campo eléctrico creado por ciertas distribuciones continuas de carga. A la hora de aportar posibles soluciones al cálculo de campos eléctrico, tenemos que recordar que hemos analizado dos posibles estrategias: a) la aplicación de la ley de Coulomb junto con el principio de superposición (dividir la distribución en infinitos elementos diferenciales de carga dq , obtener el campo creado por cada uno de ellos como si fueran cargas puntuales e integrar para toda la distribución) siempre posible, aunque, en ocasiones, puede resultar muy complejo desde el punto de vista de su resolución matemática; b) la otra estrategia es la aplicación del teorema de Gauss (imaginar una superficie cerrada que englobe a la distribución de carga parcial o totalmente, obtener el flujo mediante su definición integral por medio del teorema de Gauss, y de ahí deducir el campo). Su gran ventaja estriba en que cuando se dan las condiciones apropiadas, su aplicación resulta mucho más sencilla que la ley de Coulomb. Su limitación es que cuando no se dan las condiciones de simetría idóneas, el campo eléctrico no podría sacarse fuera de la integral; en consecuencia, tendremos que cuestionarnos, en cada caso, qué estrategia de resolución seguir.

8. Aplicaciones de las Leyes de Coulomb y de Gauss



A.41 Obtener el campo eléctrico originado por una distribución lineal de carga; Consideramos que la carga eléctrica Q se encuentra uniformemente repartida ($\lambda=Q/L$ es constante) en un hilo conductor recto de longitud L , como en el caso del electrodo central de un contador Geiger (Recuerda la simulación de la actividad A.25).

a) Si el hilo conductor tiene una longitud finita L , ¿podemos encontrar una superficie gaussiana que nos permita encontrar una solución matemática ‘sencilla’?.

b) Determina el campo eléctrico en cualquier punto P de un plano que bisecciona al hilo conductor.

c) Analiza el resultado obtenido, particularizándolo para el límite lejano en el que la distancia del punto al hilo conductor es mucho mayor que su longitud ($y \gg L$) y para el límite próximo en el que la distancia del punto al filamento es mucho menor que su longitud ($y \ll L$). ¿Encuentras especial relevancia física en los resultados de estos casos particulares?

- d) Si para puntos muy próximos, el filamento se puede considerar como si fuera de longitud infinita, basándote en las líneas de campo estudiadas en la simulación de la A.25, valora si podemos encontrar una superficie gaussiana que nos permita resolver la integral de flujo a su través.
- e) Un hilo conductor cuya longitud se considera infinita tiene una carga total Q uniformemente distribuida en él. Determina el campo eléctrico en cualquier punto P del espacio que rodea al filamento.
- f) Comparación de las soluciones exacta (ley de Coulomb y principio de superposición) con las aproximaciones de ‘puntos muy próximos’ (Gauss) y de ‘puntos muy lejanos’ (partícula puntual).

Comentario:

Esta actividad aporta situaciones para trabajar múltiples aspectos de la metodología científica en profundidad. Efectivamente, después de la teoría estudiada y de los procedimientos trabajados, estamos en condiciones de afrontar una actividad que englobe la mayoría de estos conocimientos y procedimientos.

La situación que se presenta es muy habitual en los libros de texto y se suele realizar comúnmente en las clases de problemas. Por ello, nuestra intención no es presentar aquí la resolución numérica que ya es conocida, sino cómo orientar a los estudiantes para que ellos vayan aprendiendo a resolver la situación y practicar procedimientos propios de la actividad científica. Para empezar, se presenta una situación abierta y sin datos que obliga a los estudiantes a analizar cualitativamente el problema (situarlo en un sistema de referencia, elegir variables y su dependencia, concretar el objetivo del problema a resolver, emitir hipótesis). A continuación se analizan dos posibles situaciones: a) el hilo de longitud finita; b) el hilo de longitud infinita. Este análisis pretende salir al paso de la tendencia de los estudiantes a considerar solamente el caso de hilo conductor infinito. Así pues, se analizan casos particulares, la variación de las magnitudes implicadas y su significado físico. Para finalizar se trabaja explícitamente con los estudiantes el análisis de resultados y su validación de acuerdo con las hipótesis y estrategias utilizadas.

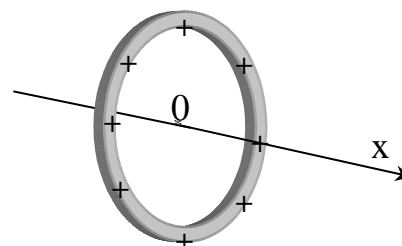


A.42 Un anillo de radio a tiene una carga positiva total Q uniformemente repartida.

Analiza, sin resolver, si consideras coherente desde el punto de vista físico que el campo eléctrico a lo largo del eje del anillo, en un punto que esté a una distancia x del centro del anillo venga dada por la expresión:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 - a^2)^{3/2}} \vec{u}_x, \text{ para lo cual se sugiere valorar los siguientes}$$

aspectos:



- a) Comprueba si la ecuación es dimensionalmente homogénea.
- b) Razonar si es coherente que el campo E tenga únicamente componente en el eje del anillo.
- c) Analizar si es plausible que el campo dependa de las magnitudes físicas en la fórmula indicadas y de la manera que lo hace.
- d) Analiza las situaciones de especial relevancia física que dentro del contexto del problema consideres que se puedan producir para ciertos valores característicos de las variables descritas en el apartado anterior (por ejemplo, $x \ll a$ o bien $x \gg a$) y contrasta su coherencia.

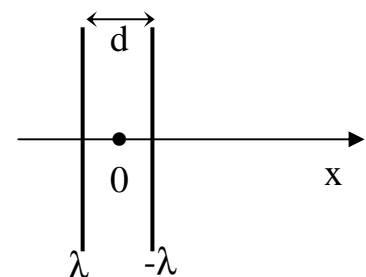
Comentario:

Esta actividad presenta otra situación bien documentada en los libros de texto para niveles introductorios de Física General. La actividad trabaja con los estudiantes explícitamente el análisis de resultados. Con frecuencia el profesorado se queja de que los estudiantes no analizan el resultado que obtiene, pero también es verdad que no se suelen proponer actividades para que ellos trabajen este procedimiento científico de forma explícita y detallada. La actividad que aquí se presenta, como en otras partes de la tutoría, trata de cubrir esta deficiencia. Se ofrece el resultado y se pide que se analice a) dimensionalmente; b) la coherencia de las magnitudes implicadas; c) la coherencia del vector resultante; d) la coherencia de casos particulares. Los estudiantes se tienen que dar cuenta, entre otras cuestiones, que la solución no es correcta ya que para el punto $x=a$ el campo eléctrico sería infinitamente grande lo que no corresponde con la lógica de la teoría, ni con la evidencia experimental.



A.43 Determinar la expresión del campo eléctrico generado por dos hilos paralelos, muy largos, separados una distancia d y de densidad lineal de carga uniforme λ y $-\lambda$:

- a) ¿Podríamos abordar el problema utilizando una única superficie gaussiana que englobe a los dos hilos, o necesariamente deberemos considerar dos, una para cada hilo, obtener los campos parciales y luego aplicar el principio de superposición? Razónalo.
- b) Halla la expresión matemática del campo pedido y particulariza el resultado para los casos $x \ll d$ y $x \gg d$. ¿Aprecias especial significado físico en estos casos límite?



Comentario:

Esta actividad presenta una situación para trabajar la validez y limitaciones de la ley de Gauss. Así, se sitúa geoméricamente el problema, pero los estudiantes tienen que concretar los puntos en los que se tiene que calcular el campo. Se les indica explícitamente una estrategia de resolución (ley de Gauss) y tienen que



analizar su viabilidad. Para finalizar se les propone el análisis de casos particulares de especial relevancia física.



A.44 Obtener el campo eléctrico originado por una distribución superficial de carga. Consideramos primeramente que la carga eléctrica Q se encuentra uniformemente repartida ($\sigma=Q/S$ es constante) en un disco circular, como los utilizados en los micrófonos electrostáticos.

a.1) Si el disco tiene una radio finito R , basándote en los resultados del análisis de líneas de campo visto antes de la actividad A.25, valora si podemos encontrar una superficie gaussiana que nos permita resolver la integral de flujo a su través.

a.2) Determinar el campo eléctrico en cualquier punto P del eje que pasa por su centro y es perpendicular a él.

a.3) Analiza el resultado obtenido particularizándolo para el límite lejano en el que la distancia del punto al disco es mucho mayor que su radio, así como para el límite próximo en el que la distancia del punto al disco es mucho menor que su radio. ¿Encuentras especial relevancia física en los resultados de estos casos particulares?

b.1) Si para puntos muy próximos al disco, éste se puede considerar como si fuera de superficie infinita, basándote en los resultados del análisis de líneas de campo previos, valora si podemos encontrar una superficie gaussiana que nos permita resolver la integral de flujo a su través.

b.2) Una superficie plana cuya área se considera infinita tiene una carga total Q uniformemente distribuida en ella (esta situación se puede encontrar al desenrollar una envoltura de plástico para alimentos). Determina el campo eléctrico en cualquier punto P del espacio que rodea a la lámina.

b.3) Haciendo uso del resultado del punto b.2 de esta actividad así como del principio de superposición, determina el campo eléctrico creado por dos láminas infinitas, separadas una distancia d , con distribución de carga uniforme σ y $-\sigma$ en cualquier punto del espacio.



A.45 Consideramos ahora que la carga eléctrica Q se encuentra uniformemente repartida ($\sigma=Q/S$ es constante) en una superficie esférica de radio R .

a) Basándote en los resultados del análisis de líneas de campo de la página 41, valora si podemos encontrar una superficie gaussiana que nos permita resolver la integral de flujo a su través.

b) Determina el campo eléctrico en cualquier punto P del espacio que la rodea. ¿Coincide este resultado con algún campo eléctrico conocido?



A.46 Obtener el campo eléctrico originado por una distribución volumétrica de carga. Consideramos que la carga eléctrica Q se encuentra uniformemente repartida ($\rho=Q/V$ es constante) en una esfera maciza de radio R .

- 1) En base a los resultados sobre líneas de campo de la página 41, valora si existe alguna diferencia entre el valor del campo para puntos exteriores a la esfera maciza que estamos considerando y el campo para puntos exteriores a la superficie esférica de la actividad A.45.
- 2) Para puntos interiores a la esfera, vimos en la página 41 que el campo no era nulo. Valora si existe una superficie gaussiana que nos permita resolver la integral de flujo a su través.
- 3) Determina la expresión del campo eléctrico en el interior de la esfera. Analiza el resultado obtenido particularizándolo para el límite en el que el punto en cuestión se encuentre sobre la misma superficie de la esfera ($r=R$). ¿Encuentras especial relevancia física en este resultado particular?

Comentario:

Las situaciones que se presentan en estas actividades son muy habituales en los libros de texto y son bien conocidas por el profesorado. Por ello, nuestra intención no es presentar aquí la resolución numérica, sino describir sucesivas propuestas de trabajo donde los estudiantes tengan que plantear cualitativamente el problema (situarlo geoméricamente, decidir las variables que intervienen, la magnitud/es a calcular), así mismo, deben elegir de forma justificada la estrategia de resolución (líneas de campo, fuerza coulombiana) y emitir como hipótesis las variables de las que depende el resultado final. A continuación, realizar los cálculos y hacer el análisis de resultados. Para finalizar se les sugiere el análisis de casos particulares.



A.47 Realiza la representación gráfica del campo eléctrico creado por una corteza esférica y la del campo correspondiente a una esfera maciza frente a la distancia al centro de las mismas.



A.48 Se quiere diseñar un dispositivo capaz de acelerar uniformemente partículas cargadas. Haciendo uso de tus conocimientos de electrostática y electrocinética, razona los fundamentos básicos de tu propuesta de diseño. A continuación te presentamos algunas cuestiones que podrían servir para orientar tu resolución:

- a) ¿Qué distribución de carga te parece la más adecuada para producir una aceleración constante sobre la partícula?
- b) ¿Cuáles son las interacciones sobre la carga mientras atraviesa el acelerador y qué efecto producen en ella?
- c) ¿Qué variables deberíamos poder controlar en el dispositivo para regular la velocidad alcanzada por las partículas que salen de él?

- d) ¿Cómo podríamos obtener la expresión de la velocidad en función de estas magnitudes?
- e) ¿Se cumplen nuestras hipótesis? ¿Es dimensionalmente homogéneo el resultado?
- f) ¿Alcanzaríamos con partículas reales velocidades elevadas en un acelerador de estas características? Aplicación al tubo de TV.

Comentario:

Las actividades A.47 y A.48, así como las que vienen a continuación, tienen como objetivo el repaso de los conceptos y capacidades trabajadas en la lección. En el caso de la A.48, estamos ante un enunciado completamente abierto (orientado por algunas cuestiones), en el que con el único dato de que la aceleración ha de ser uniforme, el profesor debe guiar a los estudiantes para que propongan un esquema de diseño de acelerador de partículas. Partiendo de este dato, los estudiantes deberán reconocer la aproximación de planos de carga uniforme infinitos y paralelos como la base física del dispositivo.

A continuación el profesor propondrá que los estudiantes valoren la duplicidad en el signo de la carga, la posible ubicación de la fuente de partículas y el efecto de la masa en el movimiento de la partícula.

El análisis de variables presenta varios puntos de interés que el profesor deberá resaltar para que los estudiantes los analicen. Así, tendrán que considerar los efectos de ciertas variables sobre el movimiento de la carga a acelerar de una manera más genérica pero, en este caso, al tratarse del diseño de un dispositivo concreto, no se deben olvidar las limitaciones que ello supone ni, tampoco, se puede omitir alguna reflexión en cuanto a cuáles son las variables que en el acelerador verdaderamente podríamos controlar.



El carácter conservativo de la fuerza eléctrica hace que un planteamiento energético nos relacione de una manera sencilla la velocidad con las variables del dispositivo. Así mismo, al poder aproximar el campo entre placas a un valor constante para separaciones muy pequeñas, la estrategia cinemático-dinámica resulta fácil de aplicar. Sin embargo, es importante que los estudiantes reflexionen acerca de la aplicabilidad de esta última vía para el caso más general en el que la interacción eléctrica varíe con la posición.

Por último, el profesor debe indicar que ya estamos analizado los fundamentos físicos de un dispositivo experimental, es importante hacerse una idea de las velocidades alcanzables con él, y encontrarle alguna aplicación directa en sistemas tecnológicos, reforzando así el interés práctico de la valoración teórica realizada.

A continuación vamos a ilustrar la resolución del problema de acuerdo con los criterios indicados:

- a) Para conseguir una aceleración constante en la partícula cargada, deberemos ejercer sobre ella una fuerza constante, por lo que el campo producido por la

distribución de carga que seleccionemos como fuente impulsora del dispositivo, deberá ser constante.

La naturaleza de la interacción eléctrica hace que su intensidad disminuya con la distancia. Únicamente hemos visto un caso en el que, asumiendo la aproximación de distribución infinita (bien porque consideramos posiciones muy próximas, o bien porque sus dimensiones son realmente grandes) el campo eléctrico es

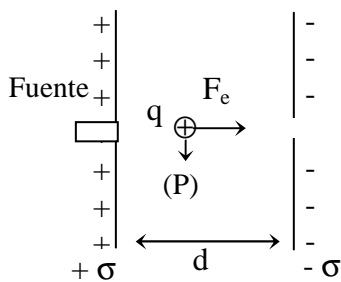
constante. Se trata del plano infinito con distribución uniforme de carga: $E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

Por otro lado, teniendo en cuenta el principio de superposición, si consideramos dos planos infinitos con cargas iguales y opuestas en la región

comprendida entre ambos el campo se duplica: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$. Ésta parece la opción más

interesante.

b)



Una partícula de carga q (por ejemplo positiva) y de masa m se verá afectada por la interacción eléctrica y la gravitatoria. Ocurre, a nivel de partículas subatómicas, que el valor de la fuerza electrostática es, generalmente, mucho mayor que el peso, de forma que podamos despreciar el efecto de esta última. Con esta aproximación el problema se simplifica puesto que, si se tiene en cuenta sólo la fuerza electrostática, la partícula describirá un

movimiento rectilíneo y uniformemente acelerado. (También se podría añadir otro sistema de placas paralelas cuya fuerza electrostática fuera igual y opuesta al peso y evitar así desviaciones).

Por otro lado, si la carga es positiva, la fuente de la cual se liberen estas partículas deberá colocarse junto a la placa positiva y justamente enfrente, en el lado de la placa negativa, habría que hacer una pequeña perforación por la que puedan salir las cargas con una determinada velocidad.

c) $v=v(\sigma, q, d, m)$

Cuanto mayor sea σ , mayor será la fuerza eléctrica y mayor la velocidad. Así mismo, mayor será la disminución de energía potencial electrostática al pasar de una placa a la otra, mayor el incremento de energía cinética y mayor la velocidad.

Cuanto mayor sea q , mayor será la fuerza eléctrica y mayor la velocidad. Así mismo, mayor será la disminución de energía potencial electrostática al pasar de una placa a la otra, mayor el incremento de energía cinética y mayor la velocidad. Sin embargo ésta no es una variable propia del dispositivo, sino que viene dada con la partícula a acelerar.

Cuanto mayor sea d , mayor será el tiempo durante el cual actúa la fuerza eléctrica y mayor la velocidad. Así mismo, mayor será la disminución de energía potencial electrostática al pasar de una placa a la otra, mayor el incremento de energía cinética y mayor la velocidad. Sin embargo, debemos recordar que, a no ser que utilicemos placas muy grandes, lo que podría suponer alguna limitación de espacio, E solamente es constante para posiciones muy próximas a las placas por lo que d no puede ser incrementada indiscriminadamente si queremos mantener una aceleración constante.

Cuanto mayor sea la masa m , más resistencia opondrá a ser acelerado por la fuerza eléctrica y por tanto alcanzará menor velocidad. Así mismo, con la energía cinética ganada de la disminución de energía potencial electrostática, a mayor masa menor velocidad. Sin embargo ésta tampoco es una variable propia del dispositivo, sino que viene dada con la partícula a acelerar.

Algunos estudiantes pueden proponer como variables independientes la carga neta de las placas, Q , o el área de las mismas, S , pero al tratarse de un plano de dimensiones infinitas (en nuestra aproximación), es la relación Q/S , es decir, la densidad superficial de carga, la magnitud que parece más apropiada para el control.

Habrà que tener en cuenta, también, que la magnitud de las variables σ y d características del dispositivo deberá alcanzar un compromiso entre el campo interno y la ruptura del dieléctrico que rodee a las placas en el caso de la densidad de carga y entre un máximo recorrido y la aproximación de campo constante en el caso de la distancia entre placas.

d) Encontramos dos vías alternativas para la resolución:

I) Como la única fuerza que realiza trabajo, la fuerza eléctrica, es conservativa la energía se mantendrá constante durante el proceso:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + qV_+ = \frac{1}{2}mv^2 + qV_-$$

Luego, $v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \sqrt{\frac{2q\sigma d}{\epsilon_0 m}}$

donde hemos tenido en cuenta que $V_+ - V_- = V = Ed = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d$

II) Al ser un M.R.U.A (lo hemos razonado con anterioridad), si aplicamos la segunda ley de Newton para obtener la aceleración, las ecuaciones cinemáticas nos permitirán obtener la velocidad buscada:

$$F = qE = q \frac{\sigma}{\epsilon_0} = ma$$

Con $a = \frac{q}{m} \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \text{cte}$ y $v = \sqrt{2ad}$ se obtiene el mismo resultado para la velocidad.

e) Observamos en el resultado obtenido que, además de las variables consideradas en las hipótesis, figura en la expresión de la velocidad el término ϵ_0 . Si en lugar del vacío tuviéramos en el espacio entre placas otro medio, la velocidad alcanzada sería diferente. Si el material fuera conductor, las placas se descargarían. Si fuera dieléctrico, el campo en su interior, por efecto de la polarización inducida en sus moléculas, sería menor y, por ello, la aceleración producida también disminuiría.

Así pues, la situación ideal parece darse cuando entre placas mantengamos el vacío. Por otro lado, esta situación aporta las ventajas de evitar la ruptura del dieléctrico entre placas, así como posibles choques entre la partícula que se acelera y las moléculas del material dieléctrico.

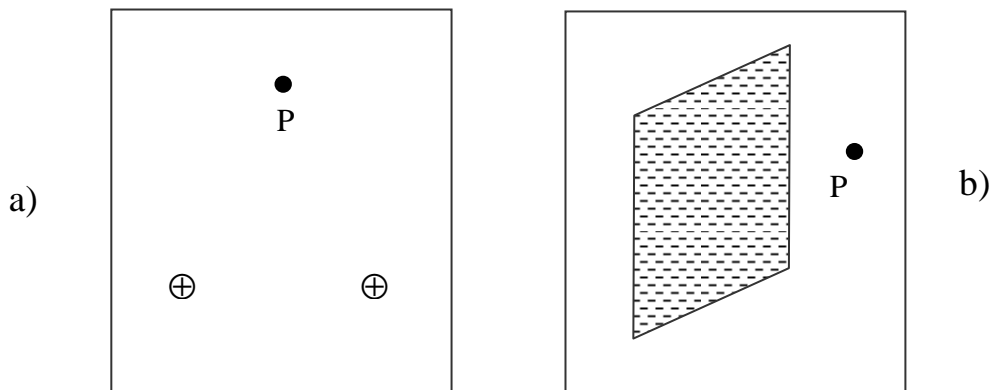
Desde la perspectiva dimensional,

$$\left(\frac{\frac{C \cdot C}{m^2} \cdot m}{\frac{C^2}{Nm^2} \cdot kg} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{m}{s}$$

f) Para saber si efectivamente un dispositivo de estas características es realmente un acelerador eficaz, podemos considerar un caso concreto y valorar la magnitud de la velocidad alcanzada. Por ejemplo, en el cañón de electrones de una TV el campo eléctrico es de $2'5 \cdot 10^6 \text{N/C}$, en una longitud de 1cm. Buscando en la bibliografía los valores de las constantes carga y masa del electrón, se obtiene una velocidad de $9,4 \cdot 10^7 \text{m/s}$ (del orden de la tercera parte de la velocidad de la luz).



A.49 Sabemos, (A.38), que el campo eléctrico que figura en la expresión matemática de la ley de Gauss es el campo total, es decir, el debido a las cargas internas y el debido a las cargas externas a la superficie gaussiana elegida. Indica si podríamos aplicar la ley de Gauss para obtener en el punto P de las figuras a) y b), el campo total. Razona detalladamente tu respuesta.





A.50 ¿Cómo podemos tener un aire ‘limpio’ de partículas en suspensión? Los filtradores de aire en las industrias de alta tecnología dedicadas a la fabricación de chips utilizados en electrónica requieren salas ‘limpias’ donde no haya más de 30 partículas de polvo por cada litro de aire (hay que tener en cuenta que en estas salas hay que hacer soldaduras de cristales de silicio del orden de las micras, 10^{-6} m.). Para llegar a esta ínfima cantidad de motas en el aire se utilizan varios sistemas de renovación y filtraje del mismo entre los que ocupa un primer plano los precipitadores electrostáticos, como los que se describen en este apartado. Lee, resume y comenta la siguiente información:

EL PRECIPITADOR ELECTROSTATICO

Un sistema para eliminar la polución del aire es el precipitador electrostático, que desde hace años hace habitables los terrenos próximos a las fábricas de cemento y a las industrias donde se procesan minerales; este dispositivo es capaz de extraer más del 99% de cenizas y polvos de los gases procedentes de las chimeneas de las centrales térmicas en las que se quema carbón. La idea básica de esta técnica antipolución se indica en la figura. Un alambre conductor que está situado en el centro del cilindro tiene una carga negativa muy grande mientras que la pared conductora exterior del cilindro está conectada a tierra. El campo eléctrico generado es muy fuerte, de geometría concéntrica y cuyas líneas de fuerza están dirigidas hacia el alambre. En estas condiciones se produce una ionización del aire situado en los alrededores del alambre, de forma que las moléculas gaseosas neutras son sustituidas por un torbellino de electrones e iones positivos libres. Los electrones se unen rápidamente a las moléculas de oxígeno formando iones O_2^- . Al desplazarse estos iones hacia la pared exterior son capturados por las pequeñas partículas que transportan los gases procedentes de la chimenea, de forma que estas partículas quedan cargadas y se desplazan hacia la superficie exterior del cilindro. Si las partículas nocivas son sólidas se provoca periódicamente una vibración del cilindro para que caigan de la pared; pero si son líquidas, el residuo desciende por la pared y se recoge en la parte exterior.

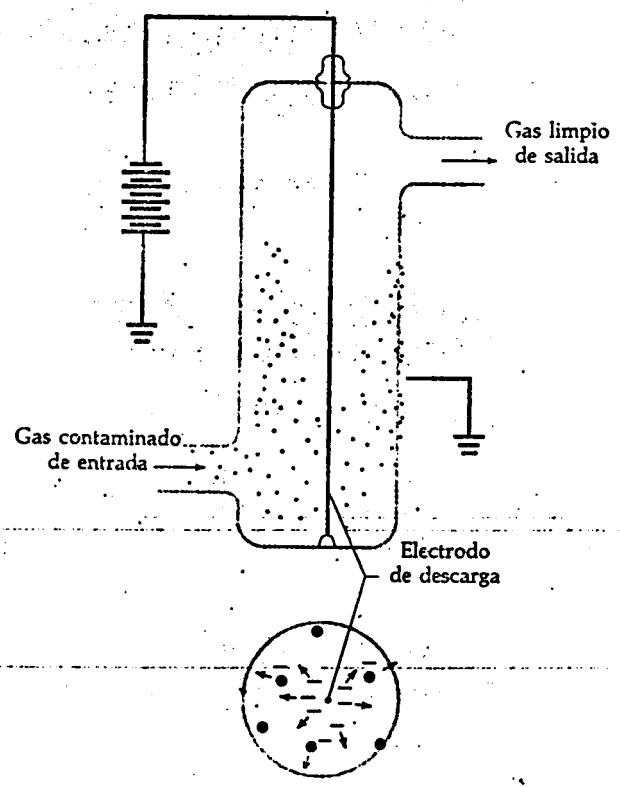


Diagrama esquemático del empleo de una descarga en corona en un precipitador electrostático.