

# 16



## INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA Y CAMPO ELÉCTRICO

**A**l igual que sucedía en la anterior unidad, los conceptos relativos a la interacción electrostática y el campo eléctrico aparecen diseminados en el Real Decreto, que los contempla en los bloques de dinámica y de energía. En esta obra nos ha parecido más razonable agruparlos en una unidad con entidad propia, una vez que se han estudiado las unidades generales dedicadas a dinámica y energía.

La primera parte de la unidad se dedica a la descripción de la interacción electrostática, introduciendo para ello una nueva magnitud, la carga eléctrica, como agente físico causante de dicha interacción. De ese modo, el alumnado ya debe adquirir una visión más amplia de las interacciones, entendiendo ciertas similitudes y diferencias. Así, si la masa es el agente físico que causa la gravitación, la carga lo es en la interacción electrostática (y electromagnética en general). Sin embargo, en la presente unidad se pone el acento en una de las grandes diferencias entre ambos tipos de interacción; si la interacción gravitatoria en la materia ordinaria es atractiva, la interacción electrostática manifiesta un carácter dual: puede ser atractiva o repulsiva, por lo que se adjudica un doble signo a la carga eléctrica. Otra diferencia radica en las constantes que aparecen en las formulaciones de la Ley de Gravitación de Newton y la Ley de Coulomb; la constante de gravitación tiene carácter universal, por el contrario la constante que aparece en la formulación de la Ley de Coulomb depende del medio.

Otro interesante aspecto es el que se deriva de la distribución de la carga en la materia a gran escala, que hace que ésta presente distintos comportamientos. De ese modo, se abordan en este tema las diferencias entre lo que denominamos materiales aislantes, conductores y semiconductores.

La descripción de la interacción electrostática desde el punto de vista dinámico finaliza con el epígrafe 3 donde, por primera vez, se define el concepto de «campo» para describir la interacción. En este nivel se ha preferido definirlo de un modo muy sucinto, dado que la descripción del concepto de campo referido a cualquier interacción (y, en particular, referido a la gravitación y el electromagnetismo) se aborda más extensamente en la obra de Física de 2º de bachillerato.

Con el epígrafe 4 se inicia la descripción de esta interacción desde un punto de vista energético, introduciendo el concepto de «potencial» eléctrico. Al igual que ya se vio que, por ejemplo, el

movimiento de caída libre puede abordarse desde el punto de vista dinámico (conociendo la fuerza que actúa y determinando la aceleración que ésta comunica a la masa) o desde un punto de vista energético (mediante las transformaciones de energía que acontecen durante la caída), es importante que el alumnado entienda que el movimiento de cargas eléctricas puede interpretarse también de esas dos maneras. Así:

- Una carga se mueve entre dos puntos debido a la aceleración que le comunica la fuerza electrostática.
- Una carga se mueve entre dos puntos si entre ellos hay una diferencia de potencial.

### Objetivos

1. Valorar la importancia de la ley de Coulomb y las consecuencias que de ella se derivan.
2. Reconocer las diferencias entre materiales conductores, aislantes y semiconductores.
3. Comprender el concepto de campo eléctrico como medio de describir la interacción electrostática.
4. Describir el movimiento de partículas cargadas en función de la diferencia de potencial entre dos puntos.

### Relación de la unidad con las competencias clave

La competencia lingüística está presente en la correcta interpretación del texto. La competencia matemática está presente en todo el desarrollo, así como en el uso de las herramientas matemáticas. La competencia digital se relaciona fundamentalmente con las propuestas de *investiga y Física, Tecnología y Sociedad*. La competencia de aprender a aprender es inherente al propio desarrollo autosuficiente de la unidad, basado en la idea primordial de toda la obra de que ésta pudiera servir para el aprendizaje autodidacta del alumnado en caso de baja.

### Temporalización

Recomendable en seis sesiones lectivas.

## PROGRAMACIÓN DIDÁCTICA DE LA UNIDAD

Contenidos	Criterios de evaluación	Estándares de aprendizaje	Relación de actividades del LA	Competencias clave
<b>La interacción electrostática</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ La carga como propiedad fundamental de la materia.</li> <li>■ Materiales aislantes y conductores.</li> </ul>	1. Reconocer el carácter de la carga eléctrica como agente físico de la interacción electrostática.	1.1 Clasifica los materiales en función de su comportamiento eléctrico.	AT: 1	CCL CAA
<b>Ley de Coulomb de la interacción electrostática</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Principio de superposición en un sistema de varias cargas</li> </ul>	2. Conocer la ley de Coulomb y caracterizar la interacción entre dos cargas eléctricas puntuales. 3. Valorar las diferencias y semejanzas entre la interacción eléctrica y gravitatoria.	2.1 Resuelve y compara las fuerzas gravitatoria y electrostática entre dos partículas de masa y carga conocida. 3.1 Halla la fuerza neta que un conjunto de cargas ejerce sobre otra carga.	A: 1-5 ER: 4 AT: 5,6,8-12,20	CMCCT
<b>El campo eléctrico</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Intensidad del campo eléctrico.</li> <li>■ Representación gráfica del campo eléctrico</li> <li>■ Efecto de los campos eléctricos sobre medios materiales.</li> </ul>	4. Conocer las magnitudes que cuantifican el campo eléctrico.	4.1 Calcula campos eléctricos debidos a una o más cargas puntuales. 4.2 Representa campos mediante líneas de fuerza en función del valor de las cargas.	A: 6-11 ER: 1,2,3,5,6 AT: 2-5, 7,8,13	CMCCT
<b>El potencial eléctrico</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Energía potencial de un sistema de dos cargas.</li> <li>■ El potencial en un punto debido a una carga puntual.</li> <li>■ Potencial creado por varias cargas puntuales</li> </ul>	5. Reconocer el carácter conservativo de la fuerza electrostática y definir la energía potencial asociada. 6. Conocer las magnitudes que determinan el potencial debido a una carga puntual	5.1 Calcula valores de potencial en un punto debido a una carga o a una distribución de cargas puntuales.	A: 12-14 ER: 6 AT: 19,21,26	CMCCT CD
<b>Trabajo realizado al desplazar cargas en un campo eléctrico: diferencia de potencial</b>	7. Vincular la diferencia de potencial eléctrico con el trabajo necesario para transportar una carga entre dos puntos de un campo eléctrico. 8. Comprender el principio del funcionamiento de los aceleradores lineales de partículas cargadas.	7.1 Calcula el trabajo necesario para trasladar una carga entre dos puntos de un campo eléctrico con la diferencia de potencial existente entre ellos. 8.1 Determina las velocidades de partículas cargadas al ser aceleradas a través de diferencias de potencial.	A: 15-17 ER: 7 AT: 15-18, 20-25, 27	CMCCT CD AA

LA: libro del alumno; A: actividades; ER: estrategias de resolución; AT: actividades y tareas;

CCL: comunicación lingüística; CMCCT: competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología; CD: competencia digital; CAA: Aprender a aprender; CSC: Competencias sociales y cívicas; CSIEE: Sentido de iniciativa y espíritu emprendedor; CCEC: Conciencia y expresiones culturales

## MAPA DE CONTENIDOS DE LA UNIDAD

PARA EL ALUMNO

**Vídeo:** La interacción electrostática

**Enlace web:**

1. Fenómenos de electrización con ejercicios resueltos; 2. Propiedades de la carga eléctrica con ejercicios resueltos

**Vídeo:** Electricidad estática

**Simulador:** 1. Fuerzas entre cargas fijas y variables ; 2. Medida de cargas eléctricas

**Vídeo:** Electricidad estática

**Enlace web:** 1. Biografía de Coulomb; 2. Ley de Coluomb; 3. Interacción electrostática con actividades; 4. Comparación entre fuerza gravitatoria y electrostática; 5. Principio de superposición de fuerzas con ejercicios (I y II)

**Simuladores:** 1. Líneas de campo; 2. Campo de un dipolo; 3. Sistema de dos cargas, 4. Cargas y campos

**Enlace web:** Ejercicios resueltos de sistemas de cargas

**Simuladores:** Campo y potencial (I y II)

**Enlace web:** Energía potencial electrostática con ejercicios

## Unidad 16: Interacción electrostática y campo eléctrico

**1. La interacción electrostática**

- 1.1. La carga como propiedad fundamental de la materia.  
1.2. Materiales aislantes y conductores.

**2. La ley de coulomb de la interacción electrostática**

- 2.1. Principio de superposición en un sistema de varias cargas

**3. El campo eléctrico**

- 3.1. Intensidad del campo eléctrico.  
3.2. Representación gráfica del campo eléctrico.  
3.3. Efecto de los campos eléctricos sobre medios materiales.

**4. El potencial eléctrico**

- 4.1. Energía potencial de un sistema de dos cargas.  
4.2. El potencial en un punto debido a una carga puntual.  
4.3. Potencial creado por varias cargas puntuales.

**Presentación**

PARA EL PROFESOR

## BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, M. y FINN, E.J.

*Física*. Addison-Wesley Longman. México 2000. Clásico de referencia en cualquier tema de Física. Tratamientos buenos y rigurosos.

HECHT, E.

*Física en perspectiva*. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington (E.U.A.) 1987. Uno de los libros de Física más amenos que se han escrito. Aborda la comprensión de la Física desde un punto de vista conceptual. Se trata de un libro «casi de lectura» con muy pocas fórmulas.

HEWITT, P. G.

*Física conceptual*. Addison-Wesley Iberoamericana. Wilmington (E.U.A) 1995. Se trata de un libro muy recomendable para la comprensión conceptual de la Física. Su lectura amena y la escasez de fórmulas hacen de este libro un material recomendable para aquellos alumnos y alumnas que sientan interés por la Física.

TIPLER, P. A.

*Física*. Editorial Reverté (3ª edición). Barcelona 1995. Clásico de referencia obligada.

**Simulador:** 1. Movimiento de cargas en campos eléctricos; 2. Acelerador lineal

**Documento:** aceleradores de partículas

**Simulador:**

Medida de la carga elemental, teoría y simulación

**Vídeo:** El experimento de Millikan

**Documento:** El experimento de Millikan

**Documento:**

Concepto de resistividad

**Tests de autoevaluación interactivos**

**5. Trabajo realizado al desplazar cargas en un campo eléctrico: diferencia de potencial**

- 5.1 Características de las fuerzas conservativas
- 5.2 Conservación de la energía mecánica
- 5.3 Conservación de la energía en presencia de fuerzas no conservativas

**Física, tecnología y sociedad**

Un bello experimento en la historia de la Física: la medida de la carga del electrón

**Técnicas de trabajo y experimentación**

Factores que determinan la resistencia a la conducción

**Estrategias de resolución y Actividades y tareas**

**Síntesis de la unidad y Evaluación**

**Pruebas de evaluación**

**WEBGRAFÍA**

**Educaplus**

<http://www.educaplus.org/>

Excelente web con buenos simuladores.

**Fiscalab**

<https://www.fiscalab.com>

Página web con propuestas de ejercicios.

**Walter Lewin**

[http://videlectures.net/walter\\_h\\_g\\_lewin/](http://videlectures.net/walter_h_g_lewin/)

Canal con las interesantes lecciones del profesor Walter H.G. Lewin del MIT (en inglés).

<https://phet.colorado.edu/es>

Colección de simuladores.

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica>

Curso interactivo de Física con ejercicios y simulaciones java.

## SUGERENCIAS DIDÁCTICAS

### INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA Y CAMPO ELÉCTRICO

Se sugiere la lectura del texto introductorio acompañado del vídeo propuesto que ilustra el texto. Posteriormente deben plantearse las cuestiones que nos permitirán averiguar los conocimientos previos acerca de los contenidos que serán tratados en la unidad.

Vídeo:  
**LA INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA**

#### 1. La interacción electrostática

Al tratar la carga eléctrica en este epígrafe, se ha de hacer ver cómo la Física (particularmente la clásica) hace uso del principio de causalidad: todo fenómeno tiene una causa. Se introdujo la denominación de carga eléctrica a mediados del siglo XVII como un modo común de hablar acerca de la cantidad de electricidad almacenada por fricción en los cuerpos. Vendría a ser algo así como un «peso eléctrico». Sin embargo, el nombre perduró.

Se destaca en este epígrafe, no obstante, la complejidad que encierra definir los conceptos fundamentales de la Física. Cuanto más fundamentales, más difíciles de definir. De hecho, por eso mismo son fundamentales, porque no pueden definirse en función de otros. No obstante, los alumnos y alumnas no deben sacar la conclusión de que la ausencia de definiciones concretas implique desconocimiento del concepto. Más bien al contrario; conocemos lo que son por lo que hacen. Ahora bien, no sabemos por qué son; ¿alguien puede explicar por qué la carga eléctrica es una propiedad del electrón como partícula fundamental de la materia?

Vídeo:  
**ELECTRICIDAD ESTÁTICA**

Enlaces web:  
**FENÓMENOS DE ELECTRIZACIÓN  
CON EJERCICIOS RESUELTOS  
PROPIEDADES DE LA CARGA ELÉCTRICA  
CON EJERCICIOS RESUELTOS**

#### 2. Ley de Coulomb de la interacción electrostática

En este epígrafe es imprescindible abordar las similitudes y diferencias entre la interacción gravitacional y la electrostática.

Se debe aprovechar la ocasión para resaltar que la ley del inverso del cuadrado de la distancia es una propiedad bastante común en los fenómenos naturales. Puede citarse como ejemplo el siguiente: si se hace pasar la luz de un foco luminoso por un pequeño orificio para proyectarla sobre una cartulina y luego se separa esta al doble de distancia, la luz se repartirá ahora en una superficie cuatro veces mayor, lo que significa que la cantidad de luz por unidad de área disminuye conforme al inverso del cuadrado de la distancia.

Esa característica la comparten también la gravitación y la interacción electrostática.

Vídeo:  
**ELECTRICIDAD ESTÁTICA**

Simulador:  
**FUERZAS ENTRE CARGAS FIJAS Y VARIABLES  
MEDIDA DE CARGAS ELÉCTRICAS**

Enlace web  
**BIOGRAFÍA DE COLUOMB  
LEY DE COLUOMB  
INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA CON ACTIVIDADES  
COMPARACIÓN ENTRE FUERZA GRAVITATORIA  
Y ELECTROSTÁTICA  
PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN DE FUERZAS  
CON EJERCICIOS (I Y II)**

#### 3. El campo eléctrico

En este epígrafe se resalta cómo el concepto de campo viene a ser una forma de interpretar un fenómeno tan complicado como es la interacción de dos cuerpos sin que medie contacto entre ellos. La idea fue introducida por Faraday y asumida por Einstein en la descripción de la gravitación. Sin embargo, se destaca que la idea de campo puede aclarar matemáticamente los aspectos relativos a la interacción, pero conceptualmente no resuelve mucho más que la noción de interacción a distancia; la pregunta acerca de por qué dos cargas interactúan a distancia puede ser sustituida ahora sin mayor éxito en la respuesta por la cuestión de por qué una carga crea un campo. La única solución sensata es que «sabemos que es así» o bien que «la idea del campo ofrece respuestas satisfactorias a los fenómenos conocidos».

Se hace especial hincapié en la idea gráfica de las líneas de fuerza y su relación con el valor del campo.

En el epígrafe 3.3 se resalta la importancia que tiene el llamado efecto de jaula de Faraday en nuestra vida cotidiana: la antena de cualquier vehículo o vivienda tiene como fin facilitar la recepción de señales electromagnéticas. De otro modo, sería imposible escuchar la radio en el interior de los coches o los hogares (donde las simples vigas metálicas o de hormigón armado son suficientes para constituir una jaula de Faraday).

Enlace web:  
**EJERCICIOS RESUELTOS DE SISTEMAS DE CARGAS**

Simuladores:  
**LÍNEAS DE CAMPO  
CAMPO DE UN DIPOLO  
SISTEMA DE DOS CARGAS  
CARGAS Y CAMPOS**

#### 4. El potencial eléctrico

Las ideas básicas que se resaltan en este epígrafe son:

- El potencial es una magnitud escalar que será positiva o negativa en función del signo de la carga.
- Si entre dos puntos hay diferencia de potencial, podrá haber movimiento de partículas cargadas. Las cargas positivas se ace-

leran al pasar de mayor a menor potencial, mientras que las negativas harán lo contrario.

- La energía potencial es una propiedad del sistema (constituido por dos cargas, por ejemplo), mientras que el potencial es una propiedad del campo creado por una carga.

Enlace web:

**ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA CON EJERCICIOS**

Simuladores:

**CAMPO Y POTENCIAL (I Y II)**

## 5. Trabajo realizado al desplazar cargas en un campo eléctrico: diferencia de potencial

Una buena manera de hacer que los alumnos entiendan por qué es necesario que exista una diferencia de potencial para que las cargas puedan moverse de un punto a otro es poner el ejemplo de qué tiene que suceder para que el agua fluya de un punto a otro; debe haber un desnivel o «diferencia de potencial gra-

vitatorio» entre esos puntos. Exactamente esa misma razón es la que hace que las cargas puedan moverse de un punto a otro. La diferencia estriba en que el hecho de que existan dos tipos de carga permite que las cargas puedan moverse no solo de mayor a menor potencial, como sería el caso del agua, sino también al revés. La analogía que podría ponerse sería algo así como que existiera un «agua de antigravedad» que pudiera fluir de abajo hacia arriba.

En este epígrafe es importante resaltar cómo se aceleran partículas cargadas con campos eléctricos estableciendo un nexo con el funcionamiento de los grandes aceleradores lineales o LINACS.

Simulador:

**MOVIMIENTO DE CARGAS EN CAMPOS ELÉCTRICOS  
ACELERADOR LINEAL**

Documento

**ACELERADORES DE PARTÍCULAS**

## SOLUCIONES DE LAS ACTIVIDADES (páginas 380/391)

### Comprueba lo que sabes

1. ¿A qué se debe que los materiales puedan presentar propiedades eléctricas?

La pregunta tiene por objetivo verificar si los alumnos tienen una idea previa acerca de la carga eléctrica como agente causante de los fenómenos electrostáticos.

2. ¿Serías capaz de definir el concepto de carga eléctrica? ¿Y el de campo eléctrico?

Los alumnos han escuchado infinidad de veces hablar de la carga eléctrica, pero cuando se les pide una definición nos encontramos con el problema de la enorme dificultad de definir los conceptos más básicos de Física.

Debemos contentarnos con respuestas del tipo *carga es el agente físico causante de los fenómenos eléctricos o campo eléctrico es la región espacial cuyas propiedades eléctricas son perturbadas por la presencia de una carga.*

3. ¿Qué diferencias fundamentales existen entre la fuerza gravitatoria que se ejercen entre si dos masas y la fuerza electrostática que aparece entre dos cargas?

Se pide que aventuren una respuesta que será analizada en el apartado 2 de la unidad. Las diferencias fundamentales estriban en que la interacción gravitatoria es universal y atractiva, mientras que la electrostática depende del medio y tiene carácter dual, además de, evidentemente, el agente físico causante de ambas interacciones.

### Actividades

1. Calcula la fuerza con que se repelen dos electrones separados entre sí una distancia de  $10^{-8}$  m y compara este resultado con el valor de la fuerza gravitacional con que se atraen.

Haciendo uso de la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{QQ'}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2}$$

Sustituyendo los datos:

$$F = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(10^{-8} \text{ m})^2} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

Calculando ahora la fuerza gravitacional con que se atraen:

$$F_g = G \frac{m_e^2}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2 \cdot \frac{(9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})^2}{(10^{-8} \text{ m})^2}$$

$$F_g = 5,52 \cdot 10^{-55} \text{ N}$$

Así pues, la fuerza electrostática con que se repelen resulta ser  $4,1 \cdot 10^{42}$  veces mayor que la fuerza gravitacional con que se atraen.

2. ¿A qué distancia deberían encontrarse dos cargas de 1 C para repelerse con una fuerza de 1 N?

A partir de la expresión de la ley de Coulomb, obtenemos:

$$r = \sqrt{k \frac{Q^2}{F}} = 94\,868,3 \text{ m}$$

3. ¿Con qué fuerza se atraen un protón y un electrón en el átomo de hidrógeno, si el radio atómico es de  $0,3 \text{ \AA}$ ?

Sustituyendo los datos en la expresión de la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(0,3 \cdot 10^{-10} \text{ m})^2} = 2,56 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

4. Dos esferas de 20 g de masa, cargadas, se encuentran suspendidas de sendos hilos de 0,5 m de longitud que penden del mismo punto del techo. Al repelerse, se comprueba que los hilos forman un ángulo de  $10^\circ$  con la vertical.

- a) ¿Cuál es la fuerza con que se repelen las cargas?

- b) ¿Cuánto valen las cargas?

- a) La condición de equilibrio exige que:

$$mg = T \cos 10^\circ$$

$$F_e = T \sin 10^\circ$$

Con los datos del enunciado, podemos despejar  $T$  en la primera igualdad:

$$T = 0,2 \text{ N}$$

Sustituyendo este valor en la segunda igualdad, resulta:

$$F_e = 0,034 \text{ N}$$

- b) Haciendo uso de este valor, podemos determinar la carga a partir de la expresión de la ley de Coulomb:

$$Q = \sqrt{F \frac{r^2}{k}} = 3,36 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

Donde  $r = 2 \cdot 0,5 \cdot \sin 10^\circ = 0,173 \text{ m}$ , según puede desprenderse de la figura.

5. Dos cargas positivas de  $3 \mu\text{C}$  se encuentran en los puntos  $(-3, 0) \text{ m}$  y  $(3, 0) \text{ m}$ , respectivamente, del eje  $X$ . Escribe en notación vectorial la fuerza neta que ejercen sobre una tercera carga  $Q_3 = -2 \mu\text{C}$  situada:

- a) En el punto  $(0, 4) \text{ m}$ .

- b) En el punto  $(6, 0) \text{ m}$ .

- c) En el punto  $(2, 0) \text{ m}$ .

- d) En el origen.

Aplicando en todos los casos la expresión de la ley de Coulomb  $\vec{F} = k \frac{QQ'}{r^2} \vec{u}_r = k \frac{QQ'}{r^2} \frac{\vec{r}}{r'}$ , obtenemos:

a)  $\vec{F}_{\text{total}} = -3,456 \cdot 10^{-3} \vec{j} \text{ N}$

b)  $\vec{F}_{\text{total}} = -6,67 \cdot 10^{-3} \vec{i} \text{ N}$

c)  $\vec{F}_{\text{total}} = 0,052 \cdot 10^{-3} \vec{j} \text{ N}$

d)  $\vec{F}_{\text{total}} = 0$

6. Halla el vector campo eléctrico en el punto  $(7, 3) \text{ m}$  originado por:

- a) Una carga de  $+3 \mu\text{C}$  situada en el punto  $(-1, 2)$ .

- b) Una carga de  $-5 \mu\text{C}$  situada en el punto  $(2, -5)$ .

Si utilizamos en ambos apartados la expresión de la ley de Coulomb, se consigue:

a)  $\vec{E} = 412,2 \vec{i} + 51,5 \vec{j} \text{ N/C}$

b)  $\vec{E} = -268 \vec{i} - 5428,7 \vec{j} \text{ N/C}$

- 7 Dos cargas positivas de  $2 \mu\text{C}$  y  $6 \mu\text{C}$ , respectivamente, se encuentran separadas  $2 \text{ m}$ . ¿A qué distancia de la carga mayor se halla el punto en el que se anulan los campos debidos a cada una de ellas?

Llamemos  $x$  a la distancia desde la carga mayor al punto,  $Q$  a la carga mayor y  $Q'$  a la menor. En el punto donde el campo es nulo, los valores de los campos debidos a cada carga son iguales, por lo que se cumplirá que:

$$k \frac{Q}{x^2} = k \frac{Q'}{(2-x)^2}$$

Resolviendo la ecuación, se obtiene que  $x = 1,268 \text{ m}$ .

- 8 ¿Por qué no pueden cruzarse las líneas de fuerza del campo creado por dos o más cargas?

Por definición, las líneas de fuerza del campo son tangentes al vector  $\vec{E}$  en cada punto, y en cada uno de esos puntos solo hay una dirección y valor del campo, pues aun en el caso de que existieran varias cargas, por aplicación del principio de superposición, habría un único vector de campo resultante.

- 9 Una carga de  $6Q$  está a una distancia,  $d$ , de otra carga,  $-Q$ . Representa las líneas de fuerza del campo creado por ambas.

El campo creado por una carga puntual  $E = kq/r^2$  es proporcional al valor de la carga y la densidad de líneas de fuerza es proporcional al valor del campo; en consecuencia, de la carga de  $6Q$  saldrán seis veces más líneas de fuerza que las que entran en  $-Q$ . Así pues, si de  $6Q$  salen  $18$  líneas de fuerza, entrarán  $3$  en  $-Q$ .

- 10 Dos cargas,  $Q_1$  y  $Q_2$ , de  $4 \mu\text{C}$  y  $-2 \mu\text{C}$ , respectivamente, están situadas en los vértices de un triángulo equilátero, como en la figura 16.15. Halla el valor del campo eléctrico resultante en el vértice superior, así como la fuerza resultante que actúa sobre la carga  $Q_3$ , de  $1 \mu\text{C}$ , situada en ese punto.

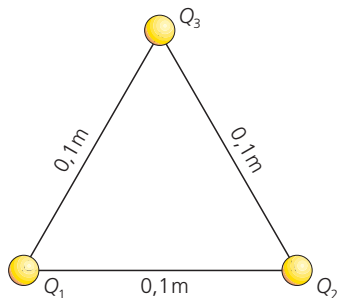


Figura 16.15.

El valor del campo creado en ese vértice por la carga  $Q_1$  es:

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2} = 3600000 \text{ N/C}$$

La dirección del campo es la recta que une  $Q_1$  y  $Q_3$ , y su sentido es saliente de  $Q_1$ . Por otra parte, el valor del campo creado por  $Q_2$  en ese mismo vértice es:

$$E_2 = k \frac{Q_2}{r_2^2} = -1800000 \text{ N/C}$$

Con el signo negativo se indica su sentido hacia la propia carga  $Q_2$ . Así pues, podemos descomponer los vectores  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  en sus componentes, con lo que se obtiene:

$$\vec{E}_1 = E_1 \cos 60^\circ \vec{i} + E_1 \sin 60^\circ \vec{j} \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_1 = (1,80 \vec{i} + 3,12 \vec{j}) \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_2 = E_2 \cos 60^\circ \vec{i} - E_2 \sin 60^\circ \vec{j} \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_2 = (0,90 \vec{i} - 1,56 \vec{j}) \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Por tanto, el campo resultante es:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = (2,70 \vec{i} + 1,56 \vec{j}) \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Teniendo en cuenta que  $\vec{F} = Q_3 \vec{E}$ , resulta:

$$\vec{F}_3 = Q_3 \vec{E} = 2,70 \vec{i} + 1,56 \vec{j} \text{ N}$$

- 11 ¿Podría una carga cualquiera permanecer en reposo en algún punto del campo creado por dos cargas iguales?

Solo podría permanecer en reposo en aquel punto donde el campo resultante creado por ambas cargas iguales fuese cero, y eso únicamente ocurre en el punto medio de la línea que une ambas cargas.

- 12 ¿Cuánto vale el potencial creado por una carga de  $6 \mu\text{C}$  a una distancia de  $1,25 \text{ m}$ ?

El potencial valdría:

$$V = k \frac{Q}{r} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{1,25 \text{ m}} = 43200 \text{ V}$$

- 13 ¿Cómo es el potencial de todos los puntos situados a la misma distancia de una carga puntual? Si consideráramos una superficie que incluyera todos esos puntos, ¿qué forma tendría?

Según se desprende de la expresión del potencial creado por una carga puntual, todos los puntos situados a igual distancia de la carga tienen el mismo valor de potencial.

Si uniéramos todos esos puntos, obtendríamos una esfera de radio  $r$  (valor de la distancia) que constituiría una superficie equipotencial.

- 14 Supongamos una carga positiva,  $Q$ , creadora de un campo. Razona cuál de las siguientes afirmaciones es correcta:

- a) Al aproximar a  $Q$  una carga testigo positiva,  $Q'$ , la energía potencial del sistema aumenta.
  - b) Al aproximar a  $Q$  una carga,  $-Q'$ , la energía potencial del sistema aumenta.
  - c) Al alejar una carga,  $-Q'$ , la energía potencial aumenta.
  - d) Al alejar una carga,  $+Q'$ , la energía potencial aumenta.
- a) La afirmación es correcta.

Puesto que  $E_p = Q'V$ , y dado que el potencial aumenta a medida que la distancia disminuye, entonces, para una carga positiva, la energía potencial del sistema se eleva al acercarse ambas cargas. Esto se debe a que ha de hacerse un trabajo externo para posibilitar el acercamiento, por lo que la energía potencial del sistema aumenta.



- b) Al contrario que en el caso anterior, esta propuesta es falsa, pues  $E_p = -Q'V$ , por lo que, al aproximar la carga  $-Q'$ , la energía potencial adquiere valores más negativos, es decir, disminuye. La razón estriba en que ahora es el propio sistema el que realiza el trabajo de acercamiento a expensas de su energía potencial, que se reduce.
- c) Esta proposición es correcta, pues, para alejar una carga negativa, debe realizarse un trabajo externo, por lo que la energía potencial del sistema aumenta.
- d) Esta proposición es falsa. Al alejar una carga, es el propio sistema el que realiza el trabajo, a costa de reducir su energía potencial (es decir, a costa de disminuir su propia capacidad de seguir realizando trabajo).

15 Teniendo en cuenta la definición de superficie equipotencial, deduce y dibuja cómo serán las superficies equipotenciales debidas a:

- a) Una carga puntual.  
 b) Una placa plana cargada positivamente.

En el caso de una carga puntual son esferas concéntricas en cuyo centro está la carga puntual, mientras que en el caso de una placa plana cargada positivamente son superficies planas y paralelas a la placa.

16 ¿Por qué no pueden cruzarse las líneas de fuerza del campo creado por ¿Cuál es la velocidad final de un electrón acelerado a través de una diferencia de potencial de 15000 V si estaba inicialmente en reposo?

Si llamamos  $e$  a la carga del electrón y hacemos uso de la expresión de la página 391 del Libro del Alumno, obtendremos:

$$\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = e\Delta V$$

Por tanto:

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m}} = 7,26 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

17 Un electrón que se mueve a  $2 \cdot 10^7$  m/s entra en una región en la que existe un campo eléctrico uniforme de 6000 N/C. ¿Qué movimiento describe? ¿Qué distancia recorre hasta que su velocidad se hace cero?

Tendrá un movimiento rectilíneo uniformemente desacelerado. Su aceleración será:

$$a = -eE/m = -1,055 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2$$

Con esa aceleración, la distancia que recorre hasta que su velocidad se hace cero viene dada por:

$$d = -v_0^2/2a = 0,189 \text{ m} = 18,9 \text{ cm}$$

## SOLUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES FÍSICA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD (página 392)

Simulador:  
**MEDIDA DE LA CARGA ELEMENTAL,  
TEORÍA Y SIMULACIÓN**

Vídeo:  
**EL EXPERIMENTO DE MILLIKAN**

Documento:  
**EL EXPERIMENTO DE MILLIKAN**

### Análisis

- 1 ¿Qué representa la igualdad plasmada en la primera ecuación escrita?

La parte izquierda de la igualdad es la diferencia entre el peso y el empuje, mientras que la parte derecha representa la fricción del medio.

- 2 En su artículo original, Millikan delimitó un valor límite a la pequeñez de las gotas de aceite analizadas, descartando aquellas que fuesen excesivamente pequeñas. ¿Se te ocurre cuál podía ser la razón para esa exclusión?

En el artículo original de Millikan se exponen las razones de la exclusión de esas gotas; su velocidad de caída sería extremadamente lenta, de modo que las posibles corrientes convectivas o el movimiento browniano podrían añadir errores a la medida.

### Propuesta de investigación

- 3 Busca información e imágenes en Internet y haz una presentación detallada acerca del experimento de Millikan y algunas de las controversias que suscitó el análisis detallado de su artículo y la acusación de selección de datos.

Los alumnos deben realizar este trabajo a partir de la documentación que encuentren en internet. Deben indagar especialmente en la acusación de cosmética de datos del experimento y si eso realmente constituyó fraude o simplemente delimitó el porcentaje de error de la medida.

## SOLUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES TÉCNICAS DE TRABAJO Y EXPERIMENTACIÓN (página 393)

Documento:  
**CONCEPTO DE RESISTIVIDAD**

### Cuestiones

- 1 ¿Observas que haya dependencia de la resistencia del conductor con respecto a la longitud? ¿Se te ocurre alguna explicación a este hecho?

Deben encontrar que la resistencia aumenta con la longitud del conductor. La razón se debe al fundamento físico de la resistencia, que no es otro que las desviaciones que sufren los electrones por los iones de la red. A mayor longitud, mayor impedimento al paso de la corriente.

- 2 ¿Observas que haya dependencia de la resistencia con respecto a la sección o grosor? ¿Se te ocurre alguna explicación a este hecho?

En este caso, un mayor grosor significa menos resistencia. Una buena analogía sería un tubo de agua de mayor diámetro o una autopista de más carriles.

- 3 ¿Cómo varía la resistencia con la temperatura? ¿Qué pasa si continuas calentando la resistencia? ¿Se te ocurre alguna explicación física de este fenómeno?

El movimiento térmico de agitación de los iones de la red dificulta el movimiento de los electrones. Un mayor calentamiento puede producir la fusión del metal, impidiendo la conducción eléctrica.

## SOLUCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS FINALES (páginas 396/397)

### Interacción electrostática y concepto de campo eléctrico

- 1 Usando la electrización por fricción, ¿cómo podríamos diferenciar una varilla de material aislante de otra de material conductor?

Al frotar un material aislante, la carga queda concentrada en la zona frotada. Este hecho se manifiesta por fenómenos de atracción o repulsión sobre otros materiales. Por el contrario, esto no sucede en los materiales conductores.

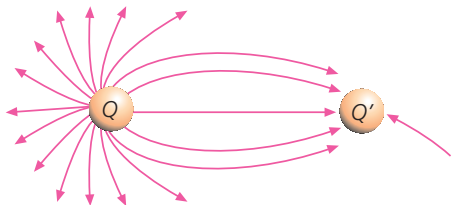
- 2 Un electrón y un protón se sitúan en el seno de un campo eléctrico uniforme. ¿Qué ocurrirá? Compara las aceleraciones que adquirirán ambas partículas.

Se empezarán a mover en sentidos opuestos: el protón lo hará en el sentido del campo, mientras que el electrón lo hará en sentido opuesto. El valor de la fuerza que actúa sobre ambos es el mismo e igual a  $eE$ . Por tanto, las aceleraciones que adquirirán serán:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$$

Como la masa del protón es 1840 veces mayor que la del electrón, su aceleración será 1840 veces menor.

- 3 Observa las líneas de fuerza del campo entre dos cargas desconocidas. Determina la relación entre  $Q$  y  $Q'$ . ¿Cuál es la carga positiva? ¿Y la negativa?



La carga de la izquierda ( $Q$ ) es tres veces mayor que la de la derecha ( $Q'$ ), puesto que de ella salen 18 líneas de fuerza, de las que solo 6 llegan a  $Q'$ . El signo de  $Q$  es positivo y el de  $Q'$  es negativo.

- 4 Una carga puntual de  $4 \mu\text{C}$  situada en el origen genera un campo eléctrico. Determina el campo eléctrico en los puntos  $A(3, 0)$ ,  $B(0, 2)$ ,  $C(1, 1)$  y  $D(2, 4)$ . ¿Qué ángulo forma el campo con el eje  $X$  en el punto  $D$ ?

El campo eléctrico en el punto  $A(3, 0)$  tiene por valor:

$$E_A = k \frac{Q}{x^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(3 \text{ m})^2} = 4000 \text{ N/C}$$

Como su dirección es a lo largo del eje  $X$ , se puede expresar vectorialmente:

$$\vec{E}_A = 4000 \vec{i} \text{ N/C}$$

En el punto  $B(0,2)$ :

$$E_B = k \frac{Q}{y^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ C}}{(2 \text{ m})^2} = 9000 \text{ N/C}$$

Puesto que su dirección y sentido es el del eje  $Y$  positivo, entonces:

$$\vec{E}_B = 9000 \vec{j} \text{ N/C}$$

En el punto  $C(1,1)$ :

$$\vec{E}_C = k \frac{Q}{r_C^2}$$

En este caso:

$$r_C^2 = x^2 + y^2 = 2$$

Por tanto, sustituyendo, obtenemos:

$$E_C = 18000 \text{ N/C}$$

El vector  $\vec{E}_C$  forma  $45^\circ$  con los ejes  $X$  e  $Y$ , por lo que las componentes  $E_{Cx}$  y  $E_{Cy}$  serán:

$$E_{Cx} = E_{Cy} = E_C \text{ sen } 45^\circ = 12728 \text{ N/C}$$

Así, dado que el campo es saliente:

$$\vec{E}_C = 12728 \vec{i} + 12728 \vec{j} \text{ N/C}$$

En el punto  $D(2,4)$ , tenemos que:

$$r_D^2 = x^2 + y^2 = 20$$

Por tanto:

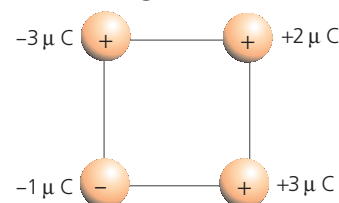
$$E_D = k \frac{Q}{r_D^2} = 1800 \text{ N/C}$$

El vector  $\vec{E}_D$  forma un ángulo de  $63,43^\circ$  con el eje  $X$  (según puede comprobarse al ser  $\text{tg } \alpha = 4/2 = 2$ ).

Por tanto:

$$\vec{E}_D = E_D \cos \alpha \vec{i} + E_D \text{ sen } \alpha \vec{j} \text{ N/C} = 805 \vec{i} + 1610 \vec{j} \text{ N/C}$$

- 5 Cuatro cargas puntuales están situadas en los vértices de un cuadrado de  $0,5 \text{ m}$  de lado. ¿Qué fuerza actúa sobre la carga negativa? ¿Cuánto vale el campo eléctrico en la posición de esa carga?



Las magnitudes de las fuerzas que ejercen las cargas de  $+3 \mu\text{C}$  sobre la carga negativa son iguales a:

$$F_1 = F_3 = k \frac{QQ'}{r_2^2} = 0,108 \text{ N}$$

Vectorialmente:

$$\vec{F}_1 = 0,108 \vec{i} \text{ N}$$

$$\vec{F}_3 = 0,108 \vec{j} \text{ N}$$

En cuanto a la magnitud de la fuerza que ejerce la carga  $+2 \mu\text{C}$  de sobre la carga negativa, vale:

$$F_2 = k \frac{QQ'}{r_2^2} = 0,036 \text{ N}$$

Donde:

$$r_2^2 = 0,5^2 + 0,5^2 = 0,5$$

Por otra parte, dicha fuerza se dirige hacia la carga positiva y forma  $45^\circ$  con los ejes, por lo que, vectorialmente:

$$\vec{F}_2 = 0,025 \vec{i} + 0,025 \vec{j} \text{ N}$$

De este modo, la fuerza total que actúa sobre la carga negativa es:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0,133 \vec{i} + 0,133 \vec{j} \text{ N}$$

Y su módulo vale:

$$F = 0,188 \text{ N}$$

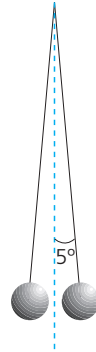
En cuanto al campo eléctrico en la posición que ocupa la carga negativa, será:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} = \frac{(0,133 \vec{i} + 0,133 \vec{j}) \text{ N}}{(-10^{-6}) \text{ C}} = -133000 \vec{i} - 133000 \vec{j} \text{ N/C}$$

Su valor es:

$$E = 188090 \text{ N/C}$$

- 6 Dos pequeñas esferas de idéntica carga y 15 g de masa cada una se encuentran suspendidas en equilibrio, como se muestra en la figura. Si la longitud de cada hilo es de 20 cm y el ángulo que forman con la vertical es de 5°, calcula la carga de las esferas.



En el equilibrio se cumplen las siguientes igualdades de módulos:

$$\begin{aligned} T \cos 5^\circ &= mg \\ T \sin 5^\circ &= F_e \end{aligned}$$

Resolviendo con los datos del enunciado, obtenemos:

$$F_e = 0,01286 \text{ N}$$

Dado que:

$$F_e = k \frac{Q^2}{d^2}$$

Y que, como puede verse en la figura:

$$d = 2 \cdot 0,2 \cdot \sin 5^\circ$$

Se obtiene:

$$Q = 4,1 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

- 7 Una carga  $Q'$  de +5 nC situada en el origen se encuentra sometida a una fuerza de  $4 \cdot 10^{-5} \vec{j}$  N. Halla:

- El campo eléctrico en el origen.
- Si dicho campo es debido a una carga  $Q$  de +72  $\mu\text{C}$ , determina el punto donde se encuentra dicha carga.

- El campo eléctrico viene dado por  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$  siendo, por

tanto, igual a  $8000 \vec{j}$  N/C.

- El valor del campo eléctrico debido a una carga puntual responde a la expresión:

$$E = K \frac{Q}{r^2}$$

Despejando  $r$  con los datos del problema, se obtiene que  $r = 9$  m. Dado que el campo en el origen está dirigido verticalmente hacia arriba, la carga que lo origina se encuentra en el punto  $(0, -9)$ .

- 8 Dos cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  idénticas y de valor  $-2 \mu\text{C}$  se encuentran en los puntos  $(-3, 0)$  y  $(3, 0)$  respectivamente. Determina:

- El campo eléctrico, en notación vectorial, en los puntos  $(0, 4)$ ,  $(0, 0)$  y  $(0, -4)$ .
- La fuerza a la que estaría sometida una carga testigo  $Q'$  de +5 nC situada en dichos puntos.

- Teniendo en cuenta la respuesta del apartado anterior, ¿qué tipo de movimiento describiría dicha partícula si fuese abandonada en reposo en el punto  $(0, 4)$ ?

- Si la masa de la carga testigo es de 3  $\mu\text{g}$ , ¿con qué período oscilará? ¿Y con qué frecuencia?

- ¿Qué ecuación describe el movimiento de dicha partícula cargada?

- Dado que las cargas son negativas, los vectores campo se dirigen hacia cada una de ellas. Procediendo como se expone en la página 210 de la unidad de herramientas matemáticas, los vectores unitarios dirigidos del punto  $(0, 4)$  a los puntos  $(-3, 0)$  y  $(3, 0)$  son, respectivamente:

$$\begin{aligned} \vec{u} &= -0,6 \vec{i} - 0,8 \vec{j} \\ \vec{u}' &= 0,6 \vec{i} - 0,8 \vec{j} \end{aligned}$$

Mientras que el valor del campo eléctrico, siendo  $r = 5$  m la distancia entre los puntos considerados, es:

$$E = K \frac{Q}{r^2} = 720 \text{ N/C}$$

Por tanto, los campos debidos a  $Q_1$  y  $Q_2$  en el punto  $(0, 4)$  son, respectivamente:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= -432 \vec{i} - 576 \vec{j} \text{ N/C} \\ \vec{E}_2 &= +432 \vec{i} - 576 \vec{j} \text{ N/C} \end{aligned}$$

Por tanto, el campo neto en dicho punto es:

$$\vec{E}(0, 4) = -1152 \vec{j} \text{ N/C}$$

Por otra parte, dado que el origen  $(0, 0)$  es equidistante de las dos cargas idénticas, el campo en dicho origen es cero.

En cuanto al punto  $(0, -4)$ , procediendo como en el primer caso se comprueba que:

$$\vec{E}(0, -4) = +1152 \vec{j} \text{ N/C}$$

- A partir de la expresión  $\vec{F} = Q' \vec{E}$ , dicha carga estaría sometida a las fuerzas:

$$\begin{aligned} \vec{F}(0, 4) &= -5,76 \cdot 10^{-6} \vec{j} \text{ N/C} \\ \vec{F}(0, -4) &= +5,76 \cdot 10^{-6} \vec{j} \text{ N/C} \end{aligned}$$

- La fuerza eléctrica sobre la carga actúa como una fuerza restauradora, dirigida en todo punto hacia el origen y valiendo cero en éste. Por tanto, la carga describirá un movimiento armónico simple.

- El valor de la aceleración máxima debido a esa fuerza es:

$$a = \frac{F}{m} = 1920 \text{ m/s}^2$$

Y como esa aceleración máxima es  $|a| = \omega^2 A$  siendo  $A$  la amplitud igual a 4 m, se deduce que:

$$\frac{4 \pi^2}{T^2} = \frac{a}{A}$$

De donde, despejando el período, se obtiene  $T = 0,28$  s y  $f = 3,49$  s<sup>-1</sup>.

e) La ecuación es del tipo  $y = A \cos \omega t$  siendo

$$\omega = \sqrt{\frac{a}{A}} = 21,9 \text{ s}^{-1}$$

Así pues:

$$y = 4 \cos 21,9 t \text{ m}$$

9 La suma de dos cargas positivas  $Q_1$  y  $Q_2$  vale  $10 \mu\text{C}$  y la fuerza mutua con que se repelen cuando están separadas  $3 \text{ m}$  es de  $10^{-2} \text{ N}$ . Determina el valor de cada una de las cargas.

Teniendo en cuenta que  $Q_1 + Q_2 = 10^{-5} \text{ C}$ , entonces:

$$Q_2 = 10^{-5} - Q_1$$

El valor de la fuerza con que se repelen viene dado por la ley de Coulomb, de modo que:

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \rightarrow 10^{-2} = 9 \cdot 10^9 \frac{Q_1 (10^{-5} - Q_1)}{9}$$

Resolviendo se obtiene:

$$Q_1 = +8,87 \mu\text{C}$$

$$Q_2 = +1,13 \mu\text{C}$$

10 Compara la fuerza eléctrica con que se atraen un protón y un electrón en el átomo de hidrógeno con la fuerza gravitatoria entre ambos.

Datos:  $m_p = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;  $r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$

Teniendo en cuenta los datos ofrecidos y considerando las expresiones de la fuerza gravitatoria entre dos masas y la electrostática entre dos cargas, se obtiene que:

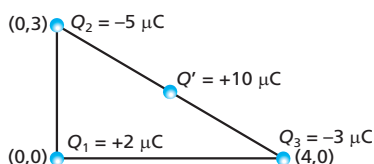
$$F_G = 3,58 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_E = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

En consecuencia:

$$F_E = 2,28 \cdot 10^{39} \cdot F_G$$

11 Determina la fuerza, en notación vectorial y en módulo, que actúa sobre la carga  $Q'$  de la figura, situada en el punto medio del segmento que une las cargas  $Q_2$  y  $Q_3$ :



La carga  $Q'$  está situada en el punto de coordenadas  $(2; 1,5)$ . Por tanto, las tres cargas están equidistantes, siendo  $r = 2,5 \text{ m}$ .

Por tanto, los valores de las fuerzas que cada una de las cargas ejerce sobre  $Q'$ , sustituyendo los correspondientes valores en la ley de Coulomb, son:

$$F_1 = 0,0288 \text{ N}$$

$$F_2 = 0,072 \text{ N}$$

$$F_3 = 0,0432 \text{ N}$$

La fuerza  $\vec{F}_1$  es saliente desde  $Q_1$ , mientras que las fuerzas  $\vec{F}_2$  y  $\vec{F}_3$  se dirigen respectivamente hacia las cargas  $Q_2$  y  $Q_3$ .

Teniendo estas direcciones presentes, los vectores unitarios en la dirección de cada una de las fuerzas son, procediendo como se expone en el problema 8:

$$\vec{u}_1 = 0,8 \vec{i} + 0,6 \vec{j} \text{ m}$$

$$\vec{u}_2 = -0,8 \vec{i} + 0,6 \vec{j} \text{ m}$$

$$\vec{u}_3 = 0,8 \vec{i} - 0,6 \vec{j} \text{ m}$$

Por lo que las fuerzas, en expresión vectorial, son:

$$\vec{F}_1 = 0,023 \vec{i} + 0,017 \vec{j} \text{ N}$$

$$\vec{F}_2 = -0,057 \vec{i} + 0,043 \vec{j} \text{ N}$$

$$\vec{F}_3 = 0,035 \vec{i} - 0,026 \vec{j} \text{ N}$$

La resultante de todas ellas es:

$$\vec{F} = 0,034 \vec{j} \text{ N}$$

12 ¿Cuánto vale la fuerza de repulsión electrostática entre dos protones en el interior de un núcleo atómico si la separación entre sus centros en máxima aproximación es de  $1,7 \text{ fm}$ ? ¿Te da este resultado alguna pista acerca de cuántos órdenes de magnitud mayor debe ser la llamada *interacción nuclear fuerte* que mantiene unidos los protones y los neutrones en el tamaño del núcleo?

La fuerza de repulsión entre dos protones, a esa distancia y haciendo uso de la ley de Coulomb, resulta ser de:

$$F = k \frac{e^2}{r^2} = 79,7 \text{ N}$$

Obsérvese que esta fuerza repulsiva entre solo dos protones equivale a la necesaria para sostener un cuerpo de  $8 \text{ kg}$ . Teniendo esto en cuenta y la increíble densidad del núcleo atómico, entenderemos que la fuerza fuerte es dos órdenes de magnitud mayor que la electrostática.

13 En un experimento similar al de la gota de aceite de Millikan, se consigue mantener suspendida en equilibrio una gota de  $1,794 \mu\text{m}$  de radio de un aceite de densidad  $890 \text{ kg/m}^3$  en un campo eléctrico de  $2000 \text{ N/C}$ . Determina cuál es la carga de la gota de aceite de este experimento y a cuántas entidades elementales de carga (electrones) corresponde.

Suponiendo que el experimento se lleva a cabo en vacío, para que la gota quede suspendida la fuerza eléctrica sobre la gota debe compensar a su peso. Expresando este último en términos de la densidad del aceite, tenemos:

$$QE = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot g$$

Expresando las cantidades ofrecidas en unidades SI y despejando  $Q$ , se obtiene:

$$Q = 1,056 \cdot 10^{-16} \text{ C}$$

Que dividido entre la carga elemental del electrón, resulta contener  $660$  entidades elementales de carga.

14 Tenemos un sistema constituido por tres pequeñas esferas conductoras, 1, 2 y 3, dos de las cuales (1 y 3) están fijas en los extremos de una varilla perfectamente aislante de  $2 \text{ m}$  de longitud. La esfera 2 es libre de desplazarse sin fricción alguna por la varilla. En el instante inicial, las esferas 1 y 3 tienen cargas de  $+0,01 \text{ C}$  y  $+0,04 \text{ C}$ , mientras que la esfera 2 tiene una carga de  $+0,02 \text{ C}$ . Determina:

- a) ¿A qué distancia de la esfera 1 se encontrará la esfera 2 en ese instante inicial?
- b) Si a continuación se hace que la esfera 2 contacte con la 3 empujándola con una varilla aislante, ¿cuál será su nueva posición de equilibrio una vez que se deje libre?



- a) En el instante inicial, la esfera 2 se encontrará en el punto de equilibrio entre las esferas 1 y 3, a una distancia  $x$  de la esfera 1 y de la esfera 3. Por tanto, en ese punto se cumplirá que los valores de las fuerzas electrostáticas de  $Q_1$  y  $Q_3$  sobre la carga  $Q_2$  son iguales, de modo que:

$$K \frac{Q_1 Q_2}{x^2} = K \frac{Q_3 Q_2}{(2-x)^2}$$

Resolviendo  $x$  con los valores ofrecidos, se obtiene:

$$x = 0,66 \text{ m}$$

- b) Al poner en contacto ambas esferas conductoras, ambas adquieren la misma carga igual a la semisuma de ambas cargas, es decir:

$$Q_2 = Q_3 = 0,03 \text{ C}$$

Sustituyendo estos nuevos valores en la igualdad anterior y resolviendo la distancia nueva, se obtiene:

$$x' = 0,73 \text{ m}$$

### Concepto de potencial y movimiento de partículas cargadas

- 15) ¿En qué sentido se desplazan las cargas negativas en un campo eléctrico: de mayor a menor potencial o al revés?

De menor a mayor potencial.

- 16) ¿Qué trayectoria seguirá un electrón que entra perpendicularmente en un campo eléctrico dirigido verticalmente hacia arriba? ¿Y un protón?

Actuará sobre el electrón una fuerza verticalmente dirigida hacia abajo, que curvará su trayectoria obligándole a describir una semiparábola como las estudiadas en el lanzamiento horizontal.

Lo mismo le ocurrirá al protón, pero en sentido opuesto.

- 17) ¿Cómo usarías un campo eléctrico para separar iones atómicos de la misma carga, pero de distinta masa?

Haciéndolos entrar perpendicularmente al campo. Si la carga es idéntica, actuará sobre ellos la misma fuerza. Sin embargo, la aceleración que esa fuerza comunica a los iones es inversamente proporcional a la masa.

De ese modo, a mayor masa, menor será la curvatura de la trayectoria y, por el contrario, cuanto menor sea la masa, más curvada será la trayectoria.

- 18) ¿Por qué no se electrocutan los pájaros que se posan sobre los cables de alta tensión?

Solo podrían electrocutarse si estuvieran en contacto con dos cables entre los que hubiera una diferencia de potencial. Pero tal diferencia de potencial no existe al posarse sobre un único cable.

- 19) Una carga de  $2 \mu\text{C}$  está situada en el origen, mientras que otra de  $10 \mu\text{C}$  se halla en el punto  $(0, 2) \text{ m}$ . ¿En qué punto tendrá el campo eléctrico un valor cero? ¿Cuánto vale el potencial en ese punto?

El campo será cero en el punto intermedio en el que los valores del campo creado por cada una de las cargas en dicho punto sean iguales. Su sentido es contrario, ya que ambas cargas son positivas y, en consecuencia, los vectores son salientes respecto de cada carga.

Así, si llamamos  $y$  a la distancia entre la carga situada en el origen y el punto, la segunda carga se encontrará a una distancia  $2 - y$ , por lo que:

$$k \frac{Q}{y^2} = k \frac{Q'}{(2-y)^2}$$

Resolviendo, obtenemos:

$$y = 0,618 \text{ m}$$

Por tanto, el punto en el que el campo es nulo es:

$$P(0, 0,618) \text{ m}$$

El valor del potencial en dicho punto es:

$$V = V_1 + V_2 = k \frac{Q}{y} + k \frac{Q'}{2-y} = 94\,249 \text{ V}$$

- 20) En una región con un campo eléctrico uniforme de  $15000 \vec{i} \text{ N/C}$  entra un electrón a  $2 \cdot 10^6 \vec{i} \text{ m/s}$ . Calcula:

- a) La aceleración que adquiere el electrón.
- b) El tiempo que tarda en llegar al reposo desde que entró en el campo.
- c) La distancia que recorre en el seno del campo hasta quedar en reposo.

- a) El electrón será sometido a una fuerza:

$$\vec{F} = -eE \vec{i} \text{ N}$$

Por tanto:

$$-eE = ma$$

Con lo que:

$$a = -eE/m = -2,6 \cdot 10^{15} \text{ m/s}^2$$

Es decir:

$$\vec{a} = -2,6 \cdot 10^{15} \vec{i} \text{ m/s}^2$$

- b) Puesto que  $v = v_0 - at$ , entonces  $0 = v_0 - at$ , de donde se obtiene:

$$t = 7,58 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

- c) La distancia que recorre hasta quedar en reposo la determinamos a partir de  $v^2 = v_0^2 - 2ax$  haciendo  $v = 0$ , por lo que:

$$x = \frac{v_0^2}{2a} = 7,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

- 21) Dos cargas fijas  $Q_1 = +15 \text{ nC}$  y  $Q_2 = -6 \text{ nC}$  se encuentran situadas en los puntos del plano  $XY$  de coordenadas  $(2, 0)$  y  $(-2, 0)$  respectivamente. Si todas las coordenadas están expresadas en metros, calcula:

- a) El potencial eléctrico que crean estas cargas en el punto A (-2, 3).
- b) El trabajo necesario para trasladar una carga igual a  $-3e$  del punto A al punto B, siendo B (2, 3).
- a) Teniendo en cuenta las posiciones de las cargas y del punto A, las distancias de cada una de ellas al punto valen, respectivamente:

$$r_{1A} = 5 \text{ m y } r_{2A} = 3 \text{ m}$$

Por tanto, el potencial en el punto A es:

$$V_A = V_{1A} + V_{2A} = K \left( \frac{Q_1}{r_{1A}} + \frac{Q_2}{r_{2A}} \right)$$

Donde, sustituyendo los valores, se obtiene  $V_A = 9 \text{ V}$

- b) El trabajo necesario para trasladar la carga citada desde A hasta B viene dado por:

$$W = Q' (V_A - V_B)$$

siendo:

$$V_B = V_{1B} + V_{2B} = K \left( \frac{Q_1}{r_{1B}} + \frac{Q_2}{r_{2B}} \right)$$

donde ahora  $r_{1B} = 3 \text{ m y } r_{2B} = 5 \text{ m}$ , por lo que:

$$V_B = 16,2 \text{ V}$$

Por tanto, el trabajo vale:

$$W = -4,8 \cdot 10^{-19} (9 - 16,2) = 3,45 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 21,6 \text{ eV}$$

- 22 ¿Qué diferencia de potencial necesitaríamos para acelerar un protón desde el reposo hasta una velocidad igual al 40 % de la de la luz?

La velocidad que alcanza el protón es  $0,4 c$ , por lo que:

$$\frac{1}{2} m (0,4 c)^2 = Q\Delta V \Rightarrow \Delta V = 7,5 \cdot 10^7 \text{ V}$$

Para ello, consideramos que la masa del protón es  $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

- 23 Moviéndose en la dirección X, un electrón tiene una velocidad de  $4 \cdot 10^6 \text{ m/s}$  en el punto (0, 0), mientras que su velocidad es de  $2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$  en el punto (6, 0). Calcula la diferencia de potencial entre ambos puntos. ¿Cuál de ellos tiene un potencial mayor?

Al pasar del punto (0, 0) al punto (6, 0), se cumple que:

$$\frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2) = -e(V_1 - V_2)$$

Resolviendo, obtenemos:

$$V_1 - V_2 = 45,38 \text{ V}$$

Como puede verse, es mayor el potencial en el punto (0, 0), pues los electrones se deceleran al pasar de puntos de mayor a menor potencial.

- 24 Un protón es acelerado a través de una diferencia de potencial de 50 000 V

- a) ¿Qué velocidad adquiere? (considera los datos de masa y carga del protón).

- b) Si con esa velocidad adquirida se le vuelve a aplicar la misma diferencia de potencial (cambiada de signo), ¿cuál será la nueva velocidad que adquirirá?

- c) ¿Y si vuelve a acelerarse de nuevo alternando por tercera vez la misma diferencia de potencial?

- a) Dado que el protón parte del reposo ( $v_0 = 0$ ), el trabajo realizado sobre él se emplea en aumentar su energía cinética, de modo que:

$$\Delta E_c = e \Delta V \rightarrow \frac{1}{2} m v_1^2 = e \Delta V$$

Despejando  $v$  a partir de los datos ofrecidos, se obtiene:

$$v_1 = 3,1 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

- b) En la siguiente aceleración se tendrá:

$$\frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) = e \Delta V \rightarrow v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{2 e \Delta V}{m}}$$

Por lo que

$$v_2 = 4,39 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

- c) En la siguiente aceleración, a la anterior velocidad le tenemos que sumar la velocidad que se deriva del incremento de la energía cinética, que en cada caso es igual a  $\frac{2 e \Delta V}{m}$ ,

por lo que la nueva velocidad es:

$$v_3 = 5,37 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

- 25 El procedimiento enunciado en el problema anterior es la base de los denominados *aceleradores lineales de partículas* o LINACS. El primero de ellos fue construido por Luis W. Álvarez en 1948.

- a) Demuestra que la velocidad final de la partícula acelerada al cabo de  $n$  ciclos de aceleración como los descritos en el problema anterior viene dada por la expresión:

$$v_{\text{final}} = \sqrt{\frac{2nQ\Delta V}{m}}$$

donde  $Q$  y  $m$  son la carga y masa de la partícula,  $\Delta V$  la diferencia de potencial y  $n$  el número de ciclos.

- b) En el primitivo acelerador lineal de Luis Álvarez se alcanzaron energías de 32 MeV. ¿Cuántos ciclos de aceleración fueron necesarios para ello?

- c) ¿Qué velocidad consiguió para los protones acelerados?

- a) Como se acaba de explicar en el problema anterior, el aumento de velocidad en cada ciclo viene dado por:

$$\frac{2Q\Delta V}{m}$$

por lo que al cabo de  $n$  ciclos de aceleración, si la partícula partió del reposo, su velocidad vendrá dada por la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{2nQ\Delta V}{m}}$$

- b) La energía de 32 MeV equivale a  $5,12 \cdot 10^{-12}$  J que será igual a  $n$  veces  $e \Delta V$ , de modo que:

$$n = \frac{5,12 \cdot 10^{-12}}{e \Delta V} = 640 \text{ ciclos}$$

- c) Igualando la anterior energía a la energía cinética y despejando la velocidad, se obtiene:

$$v = 7,85 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

- 26 Una carga puntual desconocida crea en un punto a distancia  $r$  un potencial de 5000 V y un campo eléctrico de 200 N/C. Determina a qué distancia se encuentra dicho punto y cuál es el valor y signo de la carga.

Las dos condiciones establecidas en el problema exigen que:

$$K \frac{Q}{r} = 5000 \text{ V y } K \frac{Q}{r^2} = 200 \text{ N/C}$$

Dividiendo la primera entre la segunda, se obtiene:

$$r = 25 \text{ m}$$

Sustituyendo este valor en cualquiera de las dos expresiones anteriores, se obtiene:

$$Q = +1,38 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

- 27 Un ión  ${}^{207}_{82}\text{Pb}^{+2}$  es acelerado desde el reposo entre dos placas metálicas planas y paralelas, separadas por una distancia de 2 cm, entre las que se establece una diferencia de potencial de 50000 V. Determina:

- a) La velocidad del ion de plomo al llegar a la otra placa.

- b) La aceleración a la que está sometido el ión.

- c) A partir del dato anterior, determina el valor del campo eléctrico uniforme existente entre las placas.

**Datos:**  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

- a) Como ya se ha explicado en los problemas 24 y 25, la velocidad del ion vendrá dada por la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{2Q\Delta V}{m}} = 3,054 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

- b) Esa velocidad se logra tras haber recorrido una distancia de 2 cm partiendo del reposo, por lo que, a partir de la expresión  $v^2 = 2as$  la aceleración resulta ser:

$$a = \frac{v^2}{2s} = 2,33 \cdot 10^{12} \text{ m/s}^2$$

- c) Dado que el campo eléctrico es uniforme, este se puede hallar a partir de la expresión:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ V/m (o N/C)}$$



## SOLUCIONES DE LA EVALUACIÓN FINAL (página 399)

1. ¿Por qué razón no pueden cortarse nunca las líneas de fuerza del campo eléctrico debido a una carga puntual o sistema de cargas?

Por aplicación del principio de superposición, a cada punto le corresponde un único campo eléctrico resultante de los posibles campos que se superponen en dicho punto.

2. Dos pequeñas esferas conductoras se encuentran cargadas con cargas de  $+2 \mu\text{C}$  y  $+10 \mu\text{C}$  y separadas por una distancia de 60 cm. ¿Cómo es la fuerza entre ellas y qué valor tiene?

La fuerza es repulsiva y, aplicando la ley de Coulomb, tiene por valor 0,5 N.

3. Si las esferas del problema anterior se ponen en contacto y a continuación se vuelven a separar 60 cm, ¿sigue valiendo lo mismo la fuerza que se ejercen mutuamente? Demuestra tu respuesta.

Al ponerlas en contacto, cada una de ellas adquiere una carga igual a la semisuma de las dos y, por tanto, igual a  $6 \mu\text{C}$ . Si calculamos ahora la fuerza entre ellas, resulta ser de 0,9 N.

4. Considerando de nuevo las dos esferas del problema 2, determina:

- a) ¿A qué distancia de la de menor carga se encuentra el punto en el que el campo eléctrico es nulo?  
 b) ¿Existe algún punto entre ambas cargas en el que el potencial sea nulo? ¿Y fuera de las cargas?  
 a) En el punto en el que el campo es nulo, se cumple:

$$K \frac{Q_1}{x^2} = K \frac{Q_2}{(0,6 - x)^2}$$

Resolviendo  $x$  con los valores ofrecidos, se obtiene  $x = 0,35 \text{ m}$ .

- b) Puesto que las dos cargas son positivas, no puede haber ningún punto en el que el potencial sea nulo.
5. Una carga de  $+3 \text{ mC}$  está situada en el punto (1, 2) de un sistema de referencia. Determina la expresión vectorial y el valor del campo eléctrico que origina en el punto (4, 6). ¿Qué fuerza actuaría sobre una partícula de  $+2 \mu\text{C}$  situada en dicho punto?

- a) Procediendo como se ha explicado en anteriores ejercicios (ver problemas 8 y 11), el vector unitario en la dirección de la recta que une los puntos citados es  $\vec{u} = 0,6 \vec{i} + 0,8 \vec{j}$  m siendo la distancia entre ambos puntos igual a 5 m. Por otra parte, el valor del campo eléctrico en dicho punto es:

$$E = K \frac{Q}{r^2} = 1,08 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Por tanto, el campo eléctrico en dicho punto es:

$$\vec{E} = E \cdot \vec{u} = 648\,000 \vec{i} + 864\,000 \vec{j} \text{ N/C}$$

- b) La fuerza que actuaría sobre la partícula es:

$$\vec{F} = Q\vec{E} = 1,296 \vec{i} + 1,728 \vec{j} \text{ N}$$

cuyo módulo es de 2,16 N.

6. Dos esferas cargadas de 5 g de masa penden de un mismo punto del techo mediante sendos hilos de 40 cm de longitud. El sistema queda en equilibrio cuando los hilos forman ángulo de  $30^\circ$ .

- a) Determina la carga de cada esfera indicando si son de igual o distinto signo.  
 b) Compara la fuerza gravitatoria con que se atraen las esferas con la fuerza electrostática con que se repelen.  
 a) Procediendo como en el problema 6 de las actividades y tareas finales, se obtiene que:

$$Q = d \sqrt{\frac{mg \operatorname{tg} 30}{K}} = 3,54 \cdot 10^{-7} \text{ C}$$

Ambas cargas son del mismo signo, pues se repelen. En la anterior expresión:

$$d = 2 L \sin 30 = 0,4 \text{ m}$$

- b) Sustituyendo los valores en las expresiones de las fuerzas electrostática y gravitatoria se obtiene que estas son:

$$F_e = 7,07 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_g = 1,04 \cdot 10^{-14} \text{ N}$$

por lo que la fuerza electrostática es  $6,8 \cdot 10^{11}$  veces la fuerza gravitatoria.

7. De cierta carga salen 18 líneas de fuerza, mientras que a una segunda llegan 5 líneas. Si la carga negativa del sistema es equivalente a la de  $10^{20}$  electrones, calcula, explicando el procedimiento e indicando el signo, cuánto vale cada carga.

La proporción entre ambas cargas es 18/5, siendo mayor la positiva. Dado que la carga negativa es de  $-16 \text{ C}$ , la carga positiva tendrá un valor de 57,6 C.

8. Razona la veracidad o falsedad de las siguientes afirmaciones:

- a) Si una carga positiva es el cuádruplo de otra del mismo signo, de ella saldrán 16 veces más líneas de fuerza, pues el campo es proporcional al cuadrado de la carga.  
 b) A una distancia cuatro veces mayor, el campo debido a una carga disminuye a la mitad.  
 c) Si reducimos la distancia a la mitad, el valor del campo eléctrico se hace cuatro veces mayor.  
 a) Es falsa. De la primera saldrán 4 veces más líneas que de la segunda, pues el campo es proporcional a la carga.  
 b) Es falsa. Disminuye en un factor 1/16, dado que el campo varía con el inverso del cuadrado de la distancia.  
 c) Cierta, por la razón expuesta en el apartado anterior.

9. Dos cargas de  $-20 \mu\text{C}$  y de  $+5 \mu\text{C}$  están situadas en los puntos  $(0, 4)$  y  $(0, -3)$  respectivamente, donde las distancias se miden en metros. Determina el trabajo necesario para trasladar una carga de  $-0,6 \mu\text{C}$  desde el punto  $(0, 0)$  hasta el punto  $(5, 0)$ . Expresa dicho trabajo en julios y electronvoltios.

Resolviendo exactamente del mismo modo que en el problema 21, pero con los datos ofrecidos en el problema, se obtiene que el potencial en el punto A  $(0,0)$  es igual a  $V_A = -30000 \text{ V}$ , mientras que el potencial en el punto B  $(5,0)$  es de  $V_B = -20406 \text{ V}$ , por lo que el trabajo es:

$$W = Q'(V_A - V_B) = 5,75 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 3,59 \cdot 10^{16} \text{ eV}$$

10. ¿Qué velocidad adquirirá una partícula alfa,  ${}^4_2\text{He}$ , al ser acelerada a través de una diferencia de potencial de  $25000 \text{ V}$ ? ¿Qué diferencia de potencial sería necesario aplicar para que su velocidad fuese de  $2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ ?

- a) Como se ha explicado previamente en otros ejercicios, la velocidad de una partícula al ser acelerada a través de una diferencia de potencial viene dada por:

$$v = \sqrt{\frac{2Q\Delta V}{m}} = 1,55 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

donde  $m = 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  y  $Q = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- b) La diferencia de potencial vendría dada por:

$$\Delta V = \frac{mv^2}{2Q} = 41500 \text{ V}$$

## RÚBRICA DE ESTÁNDARES DE APRENDIZAJE

Estándar de aprendizaje evaluable	Herramientas de evaluación (actividades del LA)	Excelente 3	Satisfactorio 2	En proceso 1	No logrado 0	Puntos
1.1 Clasifica los materiales en función de su comportamiento eléctrico.	AT: 1	Responde de adecuada identificando todos los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera algo incompleta, aunque válida, identificando bastantes de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde con errores, identificando pocos de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera totalmente errónea o no responde.	
2.1 Resuelve y compara las fuerzas gravitatoria y electrostática entre dos partículas de masa y carga conocida. 3.1 Halla la fuerza neta que un conjunto de cargas ejerce sobre otra carga.	A: 1-5 ER: 4 AT: 5,6,8-12,20	Responde de adecuada identificando todos los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera algo incompleta, aunque válida, identificando bastantes de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde con errores, identificando pocos de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera totalmente errónea o no responde.	
4.1 Calcula campos eléctricos debidos a una o más cargas puntuales. 4.2 Representa campos mediante líneas de fuerza en función del valor de las cargas.	A: 6-11 ER: 1,2,3,5,6 AT: 2-5, 7,8,13	Responde de adecuada identificando todos los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera algo incompleta, aunque válida, identificando bastantes de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde con errores, identificando pocos de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera totalmente errónea o no responde.	
5.1 Calcula valores de potencial en un punto debido a una carga o a una distribución de cargas puntuales.	A: 12-14 ER: 6 AT: 19,21,26	Responde de adecuada identificando todos los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera algo incompleta, aunque válida, identificando bastantes de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde con errores, identificando pocos de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera totalmente errónea o no responde.	
7.1 Calcula el trabajo necesario para trasladar una carga entre dos puntos de un campo eléctrico con la diferencia de potencial existente entre ellos. 8.1 Determina las velocidades de partículas cargadas al ser aceleradas a través de diferencias de potencial.	A: 15-17 ER: 7 AT: 15-18, 20-25, 27	Responde de adecuada identificando todos los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera algo incompleta, aunque válida, identificando bastantes de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde con errores, identificando pocos de los elementos importantes y sus relaciones.	Responde de manera totalmente errónea o no responde.	

A: actividades; ER: estrategias de resolución; AT: actividades y tareas.

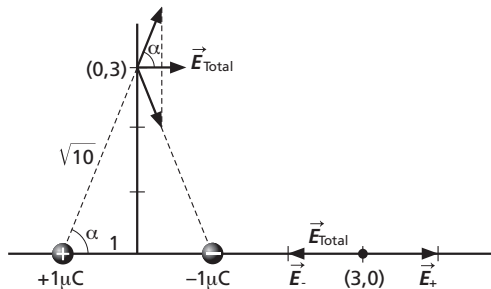
**PRUEBA DE EVALUACIÓN A**

1. Dos partículas con cargas de  $+1 \mu\text{C}$  y de  $-1 \mu\text{C}$  están situadas en los puntos del plano XY de coordenadas  $(-1, 0)$  y  $(1, 0)$  respectivamente. Sabiendo que las coordenadas están expresadas en metros, calcula:

- a) El campo eléctrico en el punto  $(0, 3)$ .
- b) El potencial eléctrico en los puntos del eje Y.
- c) El campo eléctrico en el punto  $(3, 0)$ .
- d) El potencial eléctrico en el punto  $(3, 0)$ .

Dato: constante de Coulomb,  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$

a) Los vectores  $\vec{E}$  tienen la dirección y sentido que se observan en la figura.



Dado que el valor absoluto de  $Q$  y la distancia  $r$  son iguales, los módulos del vector  $\vec{E}$  debido a cada carga son también iguales, por lo que las componentes Y de ambas se cancelan. Así pues, el vector  $\vec{E}$  resultante está orientado en la dirección X, siendo su módulo:

$$|\vec{E}_{\text{total}}| = 2 |\vec{E}| \cos \alpha$$

donde:

$$|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{10} = 900 \text{ N/C}$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{10}}$$

Por tanto:

$$|\vec{E}| = 2 \cdot 900 \cdot \frac{1}{\sqrt{10}} \text{ N/C} = 569,2 \text{ N/C}$$

b) En todos los puntos del eje Y, el potencial es nulo, pues:

$$V_{\text{total}} = k \frac{Q}{r} + k \frac{-Q}{r} = 0$$

Dada la simetría del problema respecto al eje Y, este es una línea de potencial nulo.

c) El campo eléctrico en el punto  $(3, 0)$  es:

$$\vec{E}_{(3,0)} = kQ \left( \frac{-1}{2^2} + \frac{1}{4^2} \right) \vec{i} \text{ N/C} = -1687 \vec{i} \text{ N/C}$$

d) Y el potencial en dicho punto es:

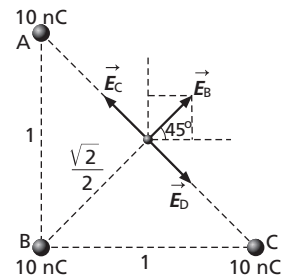
$$V_{(3,0)} = kQ \left( \frac{-1}{2} + \frac{1}{4} \right) = -2250 \text{ V}$$

2. Se disponen tres cargas de  $10 \text{ nC}$  en tres vértices de un cuadrado de  $1 \text{ m}$  de lado. Determina en el centro del cuadrado:

- a) El módulo, la dirección y el sentido del vector eléctrico.
- b) El potencial eléctrico.

Dato: constante de Coulomb,  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$

a) Dado que las tres cargas son iguales y su distancia al centro del cuadrado  $r$  es la misma, e igual a  $\sqrt{2}/2$ , se puede observar que el campo resultante equivale a  $\vec{E}_B$ :



Cuyo módulo es:

$$E_B = k \frac{|Q|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-8}}{1/2} = 180 \text{ N/C}$$

Su dirección es la de la diagonal del cuadrado que parte de B (en la disposición de la figura) y su sentido es saliente de B. Vectorialmente, sus componentes son:

$$E_x = E \cos 45^\circ = 90\sqrt{2}$$

$$E_y = E \sin 45^\circ = 90\sqrt{2}$$

$$\vec{E} = 90\sqrt{2} (\vec{i} + \vec{j}) \text{ N/C}$$

b) El potencial vale:

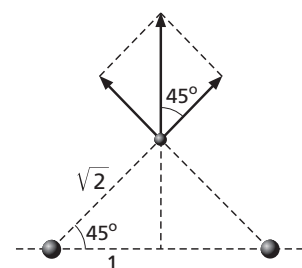
$$V_{\text{total}} = V_A + V_B + V_C = 3k \frac{Q}{r} = \frac{540}{\sqrt{2}} \text{ V} = 381,8 \text{ V}$$

3. Se disponen dos cargas eléctricas sobre el eje X: una de valor  $Q_1$  en la posición  $(1, 0)$ , y otra de valor  $Q_2$  en  $(-1, 0)$ . Sabiendo que todas las distancias están expresadas en metros, determina en los dos casos siguientes:

- a) Los valores de las cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  para que el campo eléctrico en el punto  $(0, 1)$  sea el vector:  $\vec{E} = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , siendo  $\vec{j}$  el vector unitario en el sentido positivo del eje Y.
- b) La relación entre las cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  para que el potencial eléctrico en el punto  $(2, 0)$  sea cero.

Dato: constante de Coulomb,  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$

a) Dada la simetría expuesta en el problema, el campo resultante solo puede estar dirigido a lo largo del eje Y si las dos cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  son positivas y del mismo valor.



En ese caso:

$$2 E \cos 45^\circ = 2 \cdot 10^5 k \frac{Q}{r^2} \sqrt{2} = 2 \cdot 10^5$$

$$\Rightarrow Q = \frac{2 \cdot 10^5 (\sqrt{2})^2}{9 \cdot 10^9} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

b) Para que el potencial sea cero en el punto (2, 0), las cargas han de tener signos contrarios y debe cumplirse que:

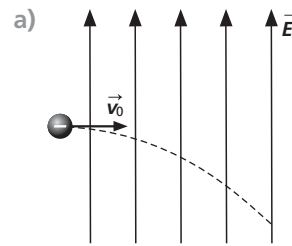
$$k \left( \frac{Q_1}{r_1} - \frac{Q_2}{r_2} \right) = 0 \Rightarrow \frac{Q_1}{1} - \frac{Q_2}{3} = 0 \Rightarrow |Q_2| = 3 \cdot |Q_1|$$

Es decir, el valor absoluto de  $Q_2$  ha de ser el triple de  $Q_1$ , pero ambas son de distinto signo.

4. Un electrón, con velocidad inicial  $3 \cdot 10^5$  m/s dirigida en el sentido positivo del eje X, penetra en una región donde existe un campo eléctrico uniforme y constante de valor  $6 \cdot 10^{-6}$  N/C dirigido en el sentido positivo del eje Y.

- a) Dibuja un esquema del movimiento de la partícula.  
b) Determina las componentes cartesianas de la fuerza experimentada por el electrón.

Datos: valor absoluto de la carga del electrón,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C



- b) Las componentes cartesianas de la fuerza experimentada por el electrón:

$$F_x = 0;$$

$$\vec{F}_y = -e\vec{E} = -9,6 \cdot 10^{-25} \vec{j} \text{ N}$$

**PRUEBA DE EVALUACIÓN B**

Señala la respuesta correcta en cada uno de los ejercicios:

1. La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales:
  - a) Es conservativa.
  - b) Es universal y solo depende de las cargas y la distancia existente entre ellas.
  - c) No realiza trabajo alguno.
2. Las líneas de fuerza de un campo eléctrico:
  - a) No pueden cruzarse nunca.
  - b) Son tangentes a en cada punto.
  - c) Indican el sentido del movimiento que tendría una carga negativa.
3. Si el campo eléctrico en un punto es cero, podemos asegurar que:
  - a) El potencial en ese punto es cero.
  - b) No hay cargas en sus proximidades.
  - c) Una carga situada en ese punto no experimentaría variación de su movimiento.
4. Al situar dos cargas de valores  $+6Q$  y  $-Q$ , respectivamente, a cierta distancia la una de la otra, podemos asegurar que:
  - a) La interacción será repulsiva.
  - b) El número de líneas de fuerza que salen de la de  $+6Q$  es seis veces mayor que el número de líneas que entran en  $-Q$ .
  - c) El potencial entre las dos cargas nunca podrá ser cero.
5. Si una partícula cargada incide en un campo eléctrico:
  - a) Puede moverse a velocidad constante.
  - b) Cambiará su velocidad.
  - c) Será rechazada.
6. El campo eléctrico neto en el interior de un conductor en equilibrio electrostático es:
  - a) Constante.
  - b) Nulo.
  - c) Depende de la ubicación del conductor.
7. El hilo  $A$  posee la mitad de longitud y la mitad de diámetro que el hilo  $B$  del mismo material; por tanto:
  - a) La resistencia de  $A$  es mayor.
  - b) La resistencia de  $B$  es mayor.
  - c) Ambos tienen la misma resistencia.
8. El hilo  $A$  tiene igual longitud y la mitad de diámetro que el hilo  $B$ . Al aplicar a sus extremos una diferencia de potencial de  $100\text{ V}$ :
  - a) Circulará por ambos la misma intensidad de corriente.
  - b) Circulará mayor intensidad por  $A$ .
  - c) Circulará mayor intensidad por  $B$ .