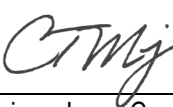


	Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	
	Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
	Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 1 de 12	

Estado del documento:	Nuevo	Modificación	X
-----------------------	-------	--------------	---

ELABORÓ	REVISÓ	AUTORIZÓ	AUTORIZÓ
			
Steven Delgadillo Quezada	Ing. Ana Liduvina López Vargas	Dr. Moises Jesus Castro Toscano	Dra. Wendolyn Elizabeth Aguilar Salinas
Profesor	Profesora	Encargado de la Materia	Coordinador del área Tronco Común

Control de cambios del documento			
Revisión	Ciclo Escolar	Autor de quien elaboro	Descripción o motivo del cambio
0	2020-2	Steven Delgadillo Quezada	Primera Versión de Paquete Didáctico
1	2021-2	Steven Delgadillo Quezada	Adecuar Material Didáctico al nuevo formato

	Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	
	Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
	Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 2 de 12	

2.1 POTENCIAL ELÉCTRICO

El concepto de energía potencial es de gran valor para el estudio de la electricidad. Ya que la fuerza electrostática es conservativa, los fenómenos de esta clase pueden describirse de manera conveniente en términos de una energía potencial eléctrica. Esta idea permite definir una cantidad escalar conocida como potencial eléctrico. Ya que el potencial eléctrico en un punto cualquiera de un campo eléctrico es una cantidad escalar, es posible aplicar esto para describir los fenómenos electrostáticos de una manera más simple que si tuviera que depender sólo del campo eléctrico y las fuerzas eléctricas.

2.1.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

Cuando se coloca una carga q en un campo eléctrico $\vec{E}$ producido por alguna distribución de carga fuente, el modelo de una partícula en un campo nos dice que hay una fuerza eléctrica $q\vec{E}$ que actúa sobre la carga. Esta fuerza es conservativa, ya que la fuerza entre cargas descrita por la ley de Coulomb es conservativa. Al analizar los campos eléctricos y magnéticos, es común utilizar la notación $d\vec{s}$ para representar un vector de desplazamiento infinitesimal que tiene una orientación tangente a una trayectoria a través del espacio. Esta trayectoria puede ser recta o curva, y la integral calculada a lo largo de esta trayectoria se conoce como integral sobre la trayectoria, o bien, integral de línea.

Para un desplazamiento infinitesimal $d\vec{s}$ de una carga puntual q inmersa en un campo eléctrico, el trabajo realizado por un campo eléctrico sobre la misma es $W_{int} = \vec{F}_e d\vec{s} = q\vec{E} \cdot d\vec{s}$. Recordemos que de la obra completa el trabajo interno hecho en un sistema es igual al negativo de la variación de la energía potencial del sistema: $W_{int} = -\Delta U$. Por lo tanto, como la carga q se desplaza, la energía potencial del sistema carga-campo cambia en una cantidad $dU = -W_{int} = -q\vec{E} \cdot d\vec{s}$. Para un desplazamiento finito de la carga desde el punto A al punto B, el cambio en energía potencial del sistema es

$$\Delta U = -q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Cambio en la energía potencial del sistema (2.1)}$$

Para una posición conocida de la carga de prueba en el campo, el sistema carga-campo tiene una energía potencial U relativa a la configuración del sistema definida como $U = 0$. Al dividir la energía potencial entre la carga se obtiene una cantidad física que depende solo de la distribución de carga fuente y tiene un valor en cada uno de los puntos de un campo eléctrico. Esta cantidad se conoce como potencial eléctrico (o simplemente potencial) V :

$$U = \frac{V}{q} \quad (2.2)$$

El potencial es sólo una característica del campo sin importar cualquier partícula con carga que pueda estar colocada en el campo. La energía potencial es característica del sistema carga-campo debido a la interacción del campo con una partícula con carga colocada en el

	Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	 Facultad de Ingeniería Mexicali
	Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
	Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 3 de 12	

mismo. Ya que la energía potencial es una cantidad escalar, el potencial eléctrico también es una cantidad escalar.

La diferencia de potencial $\Delta V = V_B - V_A$ entre los puntos A y B de un campo eléctrico se define como el cambio en energía potencial en el sistema al mover una carga q entre los puntos, dividido entre la carga:

$$\Delta V \equiv \frac{\Delta U}{q} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \text{Diferencia de potencial entre dos puntos (2.3)}$$

En esta definición, el desplazamiento infinitesimal $d\vec{s}$ se interpreta como el desplazamiento entre dos puntos en el espacio, en vez del desplazamiento de una carga puntual. Al igual que en el caso de la energía potencial, sólo las diferencias en el potencial eléctrico tienen significado. A menudo conviene hacer que en algún punto el valor del potencial eléctrico sea igual a cero. La diferencia de potencial no debe confundirse con la diferencia en energía potencial. La diferencia de potencial entre A y B existe únicamente por una carga fuente y depende sólo de la distribución de carga fuente. Para que exista una energía potencial tenemos que tener un sistema de dos o más cargas. La energía potencial pertenece al sistema y cambia sólo si una carga se mueve en relación con el resto del sistema. Esta situación es similar a la del campo eléctrico. Un campo eléctrico existe solamente debido a una carga fuente. Una fuerza eléctrica requiere dos cargas: la carga fuente para establecer el campo y otra carga colocada dentro de ese campo. Consideremos ahora la situación en que un agente externo mueve la carga en el campo. Si un agente externo traslada una carga de a sin modificar la energía cinética de ésta, el agente realiza un trabajo que modifica la energía potencial del sistema: $W = \Delta U$. El trabajo realizado por un agente externo al desplazar una carga q a través de un campo eléctrico con una velocidad constante es

$$W = q\Delta V \quad (2.4)$$

Ya que el potencial eléctrico es una medida de la energía potencial por unidad de carga, la unidad del SI, tanto del potencial eléctrico como de la diferencia de potencial, es joules por cada coulomb, que se define como un volt (V):

$$1V \equiv 1 \frac{J}{C}$$

Es decir, se deberá realizar 1 J de trabajo para trasladar 1 C de carga a causa de una diferencia de potencial de 1 V. La ecuación 2.4 muestra que la diferencia de potencial tiene unidades de campo eléctrico multiplicadas por la distancia. De esto se concluye que la unidad del SI del campo eléctrico (N/C) también puede expresarse en volts por cada metro: $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$. Por lo tanto, se puede establecer una nueva interpretación del campo eléctrico. El campo eléctrico es una medida de la relación de cambio del potencial eléctrico en función de la posición.



Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	 Facultad de Ingeniería Mexicali
Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 4 de 12	

Una unidad de energía comúnmente utilizada en física atómica y nuclear es el electrón volt (eV), que se define como la energía que un sistema carga-campo gana o pierde cuando se desplaza una carga de magnitud e (un electrón o un protón) a causa de una diferencia de potencial de 1 V. Como $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ y la carga fundamental es $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, el electrón volt se relaciona con el joule de esta manera:

$$1\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{C} \cdot V = 1.60 \times 10^{-19} \text{J} \quad (2.5)$$

2.1.2 Diferencia de potencial en un campo eléctrico uniforme

Las ecuaciones 2.1 y 2.3 son válidas en todos los campos eléctricos, sean uniformes o variables, pero estas ecuaciones se simplifican si el campo es uniforme. Primero imagine un campo eléctrico uniforme dirigido a lo largo del eje negativo y , como se muestra en la figura 1a. Calcule la diferencia de potencial entre dos puntos A y B separados por una distancia d , donde el desplazamiento $\vec{s}$ apunta de A hacia B es paralelo a las líneas de campo. La ecuación 2.3 da:

$$V_B - V_A = \Delta V = - \int_A^B \vec{E} d\vec{s} = - \int_A^B E ds (\cos 0^\circ) = - \int_A^B E ds$$

Dado que E es una constante, se puede retirarla de la integral; esto lo conduce a:

$$\Delta V = -E \int_A^B ds$$

$$\Delta V = -Ed \quad (2.6) \text{ Diferencia de potencial entre dos puntos en un campo eléctrico uniforme}$$

El signo negativo en la ecuación 2.6 se debe al hecho de que empezamos en el punto A y nos movimos a un nuevo punto en la misma dirección que las líneas de campo eléctrico. Si partimos de B y nos cambiamos a A , la diferencia de potencial sería $+Ed$. En un campo eléctrico uniforme, la magnitud de la diferencia de potencial es Ed y el signo puede ser determinado por la dirección de desplazamiento.

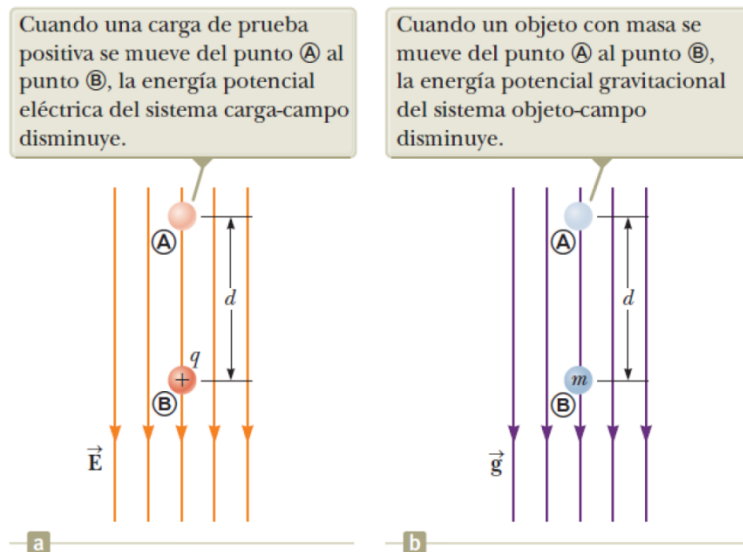


Figura 1 (a) Cuando el campo eléctrico $\vec{E}$ se dirige hacia abajo, el punto B está en un potencial eléctrico menor que el punto A. (b) Situación gravitatoria análoga a la presentada en (a).

El signo negativo indica que el potencial eléctrico en el punto B es inferior al del punto A; es decir $V_B < V_A$. Las líneas de campo eléctrico siempre apuntan en la dirección que disminuye el potencial eléctrico, como se muestra en la figura 1a. Ahora suponga que una carga q se mueve desde A hacia B; se puede calcular cambio en la energía potencial del sistema carga-campo con las ecuaciones 2.3 y 2.6:

$$\Delta U = q\Delta V = -qEd \quad (2.7)$$

Este resultado muestra que si q es positiva, entonces ΔU es negativa. Por lo tanto, un sistema consistente de una carga positiva y un campo eléctrico pierde energía potencial eléctrica cuando la carga se mueve en la dirección del campo. Si una carga positiva es liberada desde el reposo en este campo eléctrico, experimenta una fuerza eléctrica $q\vec{E}$ en la dirección de $\vec{E}$ (hacia abajo en la figura 1a). En consecuencia, se acelerará hacia abajo, adquiriendo energía cinética. Conforme esta partícula con carga adquiere energía cinética, el sistema carga-campo pierde una cantidad igual de energía potencial. Esto no debe sorprenderle, simplemente es la conservación de la energía mecánica en un sistema aislado. La figura 1b muestra una situación análoga con un campo gravitatorio. Cuando una partícula de masa m se libera en un campo gravitacional acelera hacia abajo, ganando energía cinética. Al mismo tiempo, la energía potencial gravitatoria del sistema objeto-campo disminuye.

La comparación entre un sistema de una carga positiva que reside en un campo eléctrico y un objeto con masa que reside en un campo gravitatorio en la figura 1 es útil para conceptualizar el comportamiento eléctrico. La situación eléctrica, sin embargo, tiene una característica que la situación gravitacional no: la carga puede ser negativa. Si q es negativa, entonces ΔU en la ecuación 2.7 es positiva y la situación se invierte.



Un sistema formado por una carga negativa y un campo eléctrico adquiere energía potencial eléctrica cuando la carga se mueve en la dirección del campo. Si se libera una carga negativa desde el reposo en un campo eléctrico, se acelera en la dirección opuesta a la dirección del campo. Para que una carga negativa se mueva en la dirección del campo, deberá existir un agente externo que aplique una fuerza y realice un trabajo positivo sobre la carga. A cualquier superficie formada por una distribución continua de puntos con el mismo potencial eléctrico se le denomina superficie equipotencial. Las superficies equipotenciales asociadas con un campo eléctrico uniforme consisten en una familia de planos paralelos, todos ellos perpendiculares al campo.

2.1.3 Potencial eléctrico y energía potencial debidos a cargas puntuales

Para determinar el potencial eléctrico en un punto ubicado a una distancia r de la carga, inicie con la expresión general para la diferencia de potencial (ecuación 2.3)

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} d\vec{s} \quad (2.8)$$

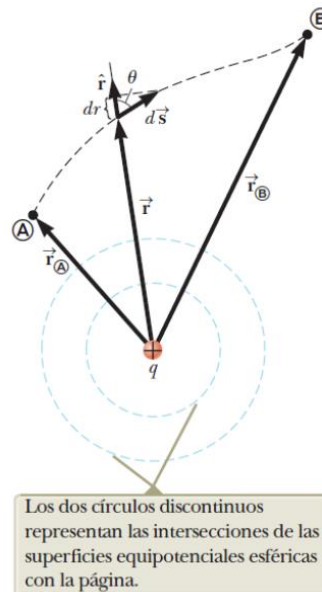


Figura 2 La diferencia de potencial entre los puntos A y B a causa de una carga puntual q depende sólo de las coordenadas radiales r y r inicial y final.

Donde r y s son los dos puntos arbitrarios que se muestran en la figura 2. En cualquier punto en el espacio el campo eléctrico a causa de la carga puntual es $\vec{E} = \left(\frac{K_e q}{r^2}\right) \hat{r}$, donde $\hat{r}$ es un vector unitario radialmente hacia fuera de la carga. Por lo tanto, la cantidad $\vec{E} d\vec{s}$ puede expresarse como



Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	 Facultad de Ingeniería Mexicali
Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 7 de 12	

$$\vec{E} \cdot d\vec{s} = K_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \cdot d\vec{s} \quad (2.9)$$

Como la magnitud de $\hat{r}$ es 1, el producto punto $\vec{r} d\vec{s} = ds \cdot \cos\theta$, donde θ es el ángulo entre $\vec{r}$ y $d\vec{s}$. Además $ds \cos\theta$, es la proyección de $d\vec{s}$ sobre $\vec{r}$; debido a eso $ds \cos\theta = dr$. Es decir, cualquier desplazamiento $d\vec{s}$ a lo largo de la trayectoria del punto A al punto B produce un cambio dr en la magnitud de $\vec{r}$, el vector de posición del punto en relación con la carga que crea el campo. Con estas sustituciones $\vec{E} d\vec{s} = \left(\frac{K_e q}{r^2}\right) dr$; en consecuencia, la expresión de la diferencia de potencial se convierte en

$$V_B - V_A = -K_e q \int_{ra}^{rb} \frac{dr}{r^2} = K_e \frac{q}{r} \Big|_{ra}^{rb}$$
$$V_B - V_A = K_e q \left[\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right] \quad (2.10)$$

La ecuación 2.10 muestra que la integral de $\vec{E} d\vec{s}$ es independiente de la trayectoria entre los puntos A y B. Al multiplicar por una carga q_0 que se mueve entre los puntos A y B, se ve que la integral de $q_0 \vec{E} d\vec{s}$ también es independiente de la trayectoria. Esta última integral que representa el trabajo realizado por la fuerza eléctrica sobre la carga q_0 , señala que la fuerza eléctrica es conservativa. Al campo que se relaciona con una fuerza conservativa se le define como campo conservativo. Debido a eso, la ecuación 2.10 indica que el campo eléctrico de una carga puntual fija q es conservativo. Además, la ecuación 2.10 expresa el resultado importante de que la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera y en un campo producido por una carga puntual depende sólo de las coordenadas radiales r_A y r_B . Por lo común, se elige la referencia del potencial eléctrico de una carga puntual de forma que sea $V = 0$ en $r_A = \infty$. Con esta referencia, el potencial eléctrico establecido por una carga puntual a cualquier distancia r de la carga es

$$V = k_e \frac{q}{r} \quad (2.11)$$

El potencial eléctrico resultante de dos o más cargas puntuales se obtiene mediante la aplicación del principio de superposición. Es decir, el potencial eléctrico total en algún punto P debido a varias cargas puntuales es la suma de los potenciales debidos a las cargas individuales. Para un grupo de cargas puntuales, puede expresar el potencial eléctrico total en P como

$$V = K_e \sum_i \frac{q_i}{r_i} \quad (2.12) \text{ potencial eléctrico debido a varias cargas puntuales}$$

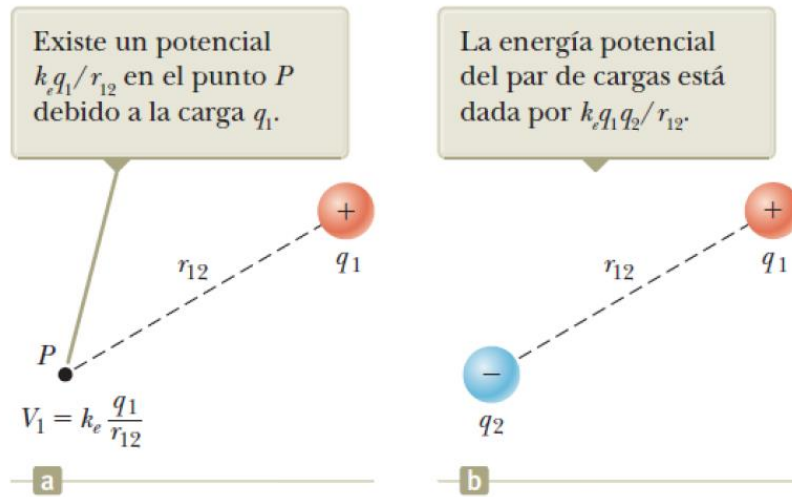


Figura 3 (a) La carga q_1 establece un potencial eléctrico V_1 en el punto P . (b) la carga q_2 es traída desde el infinito al punto P .

La figura 3a muestra una carga q_1 que establece un campo eléctrico a través del espacio. La carga también establece un potencial eléctrico en todos los puntos, incluyendo el punto P , donde el potencial eléctrico es V_1 . Ahora imagine que un agente externo trae una carga q_2 desde el infinito hasta el punto P . El trabajo que hay que hacer para hacer esto se da por la ecuación 2.4, $W = q_2 \cdot \Delta V$. Este trabajo representa una transferencia de energía hacia el interior del sistema y aparece en éste como energía potencial U cuando las partículas están separadas una distancia r_{12} (figura 3b). Por lo tanto, la energía potencial eléctrica de un par de cargas puntuales puede determinarse de la siguiente forma:

$$\Delta U = W = q_2 \Delta V \rightarrow U - 0 = q_2 \left(K_e \frac{q_1}{r_{12}} - 0 \right)$$

$$U = K_e \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (2.13)$$

Si las cargas son del mismo signo, U es positiva. Un agente externo debe realizar un trabajo positivo sobre un sistema para acercar las dos cargas (ya que cargas del mismo signo se repelen). Si las cargas son de signos opuestos, como en la figura 3b, entonces U es negativa. Un agente externo deberá realizar un trabajo negativo en contra de la fuerza de atracción entre cargas de signo opuesto al acercar la una a la otra; debe aplicarse una fuerza opuesta al desplazamiento para impedir que q_2 se acelere hacia q_1 . Si el sistema consiste en más de dos partículas con carga se obtiene la energía potencial total si calcula U para cada par de cargas y suma los términos algebraicamente. Como un ejemplo, la energía potencial total del sistema de tres cargas que se muestra en la figura 4 es



$$U = K_e \left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} \right) \quad (2.14)$$

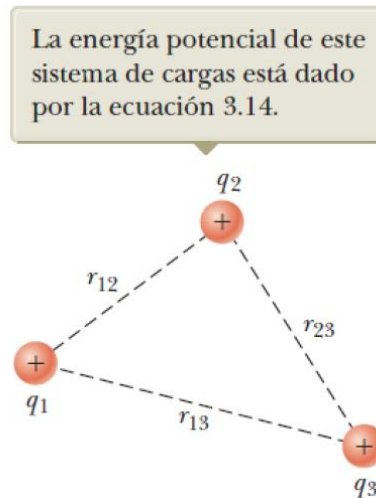


Figura 4 Tres cargas puntuales están fijas en las posiciones que se muestran.

2.1.4 Obtención del valor del campo eléctrico a partir del potencial eléctrico

El campo eléctrico $\vec{E}$ y el potencial eléctrico V están relacionados, como se mostró en la ecuación 2.3, que se usa para encontrar ΔV si el campo eléctrico $\vec{E}$ se conoce. ¿Qué pasa si la situación se invierte? ¿Cómo se calcula el valor del campo eléctrico si el potencial eléctrico se conoce en una determinada región? Mediante la ecuación 2.3 exprese la diferencia de potencial dV entre dos puntos separados una distancia ds como

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.15)$$

Si el campo eléctrico tiene sólo una componente E_x , entonces $\vec{E} d\vec{s} = E_x dx$. Por tanto, la ecuación 2.13 se convierte en $dV = -E_x dx$

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad (2.16)$$

Es decir, la componente en x del campo eléctrico es igual al negativo de la derivada del potencial eléctrico respecto a x . Pueden hacerse enunciados similares acerca de las componentes en y y en z . La ecuación 2.16 es la afirmación matemática del hecho de que el campo eléctrico es una medida de la rapidez de cambio del potencial eléctrico con la posición. Experimentalmente, el potencial eléctrico y la posición se pueden medir con facilidad si utiliza un voltímetro (dispositivo para medir la diferencia de potencial) y una cinta métrica. En consecuencia, un campo eléctrico se determina al medir el potencial eléctrico en varias posiciones en el campo y dibujando una gráfica de los resultados. De acuerdo con la ecuación 2.16, la pendiente de la gráfica de V en función de x en un punto determinado proporciona la magnitud del campo eléctrico en ese punto.



Las superficies equipotenciales asociadas con un campo eléctrico uniforme están constituidas por una familia de planos perpendiculares a las líneas de campo. La figura 5a muestra algunas superficies equipotenciales representativas de esta situación.

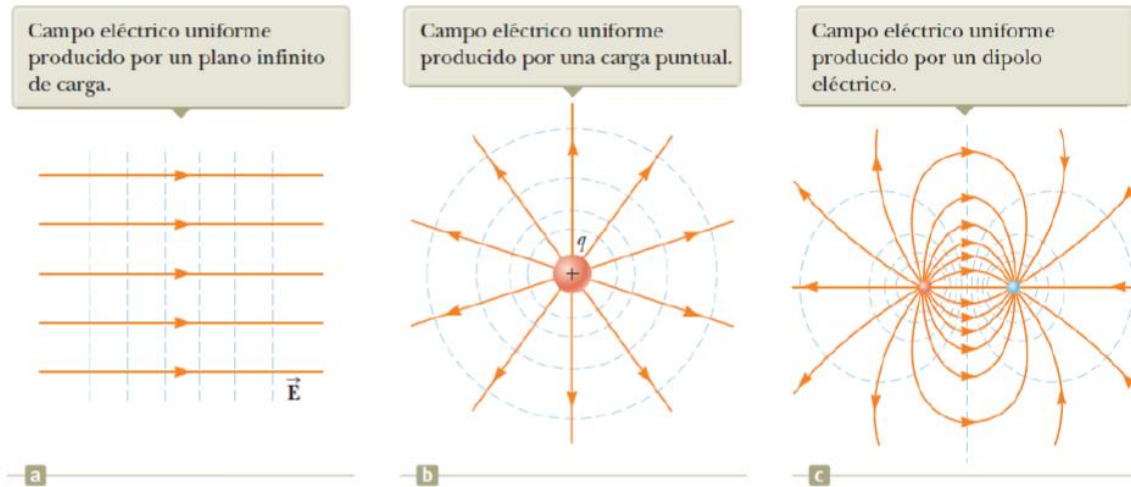


Figura 5 Superficies equipotenciales (las líneas azules punteadas son las intersecciones de estas superficies con la página) y las líneas de campo eléctrico. En todos los casos, las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico en todos los puntos.

Si la distribución de carga que origina un campo eléctrico tiene simetría esférica, tal que la densidad de carga volumétrica depende sólo de la distancia radial r , el campo eléctrico es radial. En este caso, $\vec{E}d\vec{s} = E_x dx$, y se puede expresar dV como $dV = -E_r dr$. Por lo tanto,

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (2.17)$$

Por ejemplo, el potencial eléctrico de una carga puntual es $V = kq/r$. Debido a que V es sólo función de r , la función potencial tiene simetría esférica. Al aplicar la ecuación 2.17, encuentra que la magnitud del campo eléctrico debido a la carga puntual es $E_r = kq/r^2$, un resultado familiar. Observe que el potencial sólo cambia en dirección radial, no en cualquier dirección perpendicular a r . Por tanto, V (igual que E_r) sólo es función de r , lo cual es consistente con la idea de que las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo. En este caso, las superficies equipotenciales forman una familia de esferas concéntricas con la distribución de carga de simetría esférica (figura 5b). Las superficies equipotenciales para un dipolo eléctrico se trazan en la figura 5c. En general, el potencial eléctrico es una función de las tres coordenadas espaciales. Si $V(r)$ se da en coordenadas cartesianas, las componentes E_x , E_y y E_z del campo eléctrico pueden ser determinadas fácilmente a partir de $V(x, y, z)$ como derivadas parciales:

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad E_y = -\frac{dV}{dy} \quad E_z = -\frac{dV}{dz} \quad (2.19) \text{Determinación del campo eléctrico a partir del potencial.}$$



Resuelve los siguientes reactivos:

1. Una batería tiene una diferencia de potencial específica ΔV entre sus terminales y se establece dicha diferencia de potencial entre los conductores unidos a las terminales. Una batería de 12 V se conecta entre dos placas paralelas, como se muestra en la figura 6. La separación entre las placas es $d = 0.30$ cm y se supone que el campo eléctrico entre las placas es uniforme. Encuentre la magnitud del campo eléctrico entre las placas

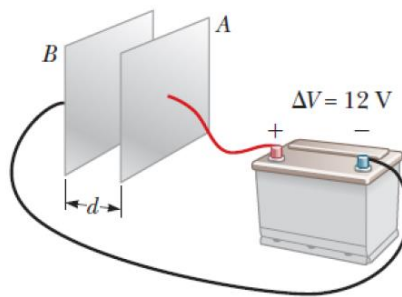


Figura 6 Una batería de 12 V conectada a dos placas paralelas. El campo eléctrico entre las placas tiene una magnitud determinada por la diferencia de potencial ΔV dividida entre la separación de las placas d .

2. Como se muestra en la figura 7a, una carga $q_1 = 2.00 \mu\text{C}$ se ubica en el origen y una carga $q_2 = 26.00 \mu\text{C}$ se ubica en $(0, 3.00)$ m. (A) Encuentre el potencial eléctrico total debido a estas cargas en el punto P, cuyas coordenadas son $(4.00, 0)$ m. (B) Encuentre el cambio en energía potencial del sistema de dos cargas más una tercera carga $q_3 = 3.00 \mu\text{C}$ conforme la última carga se mueve del infinito al punto P (figura 7b).

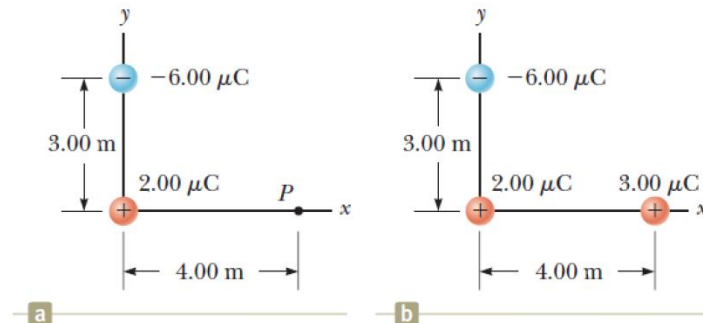


Figura 7 (a) El potencial eléctrico en P debido a las dos cargas q_1 y q_2 es la suma algebraica de los potenciales debidos a las cargas individuales. (b) Una tercera carga $q_3 = 3.00 \mu\text{C}$ se lleva desde el infinito al punto P.

	Facultad de Ingeniería Mexicali	Ciclo Escolar: 2021-2	
	Material Didáctico Electricidad y Magnetismo	Formación Básica	
	Unidad 2, Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica	Pág. 12 de 12	

3. Demuestre que la cantidad de trabajo necesario para agrupar cuatro cargas puntuales idénticas de magnitud Q en las esquinas de un cuadrado de lado s es $5.41 \text{ keQ}^2/s$

4.- El potencial en una región entre $x=0$ y $x=6 \text{ m}$ es $V=a+bx$ donde $a=10.0\text{v}$ y $b=-7.0\text{v/m}$. Determine a) el potencial en $x=3.0\text{m}$ y 6.0m , y b) la magnitud y dirección del campo eléctrico en $x=3.0\text{m}$ y 6.0m