

REPASO CLASES PASADAS

CARGA ELÉCTRICA: dos clases *positiva* y *negativa*.

Unidad S.I: **coulomb (C)**.

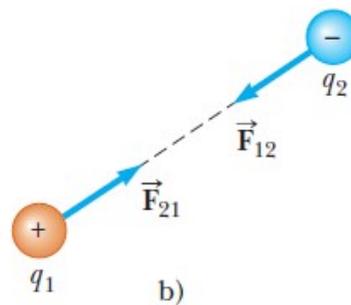
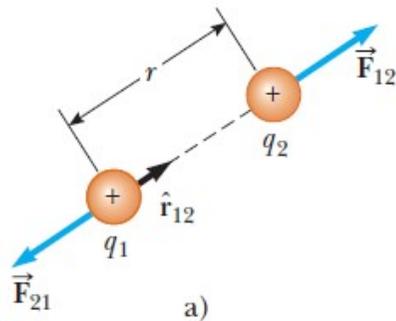
Cuantización: Se presenta por múltiplos enteros de la **unidad fundamental de carga eléctrica e**. (electrón $-e$, y protón $+e$).

$e = 1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C}$ ($e \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) ($6,24 \times 10^{18} e = 1 \text{ C}$)

Principio de conservación de la carga eléctrica: la carga se conserva, ni se crea ni se destruye.

LEY DE COULOMB: fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales estacionarias:

$$F_{12} = k_E \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



$$\vec{F}_{12} = k_E \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad k_E - \text{constante de Coulomb}$$

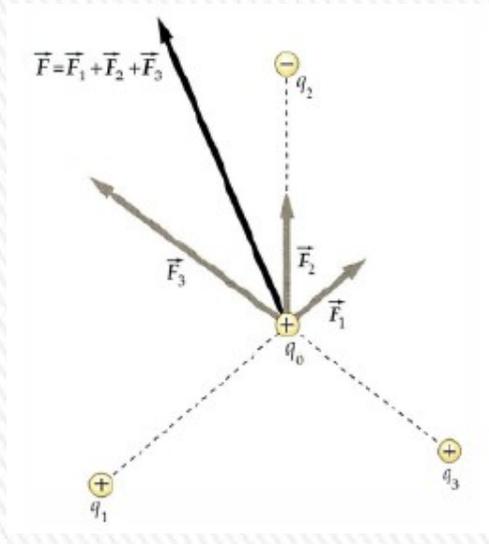
$$k_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,987551787 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

$$k_E \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$$

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N.m}^2) \text{ (permitividad del vacío)}$$

REPASO CLASES PASADAS

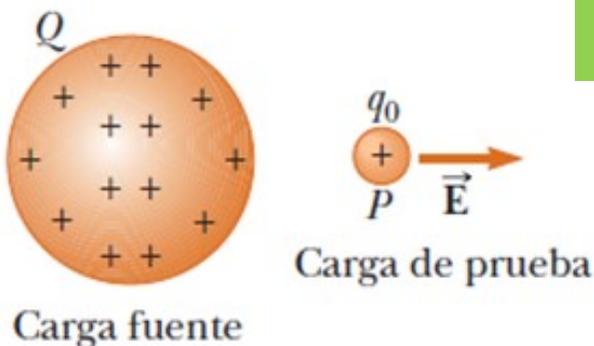
- Es una **fuerza central** y depende del **inverso del cuadrado de la distancia**.
- Se aplica a cargas puntuales y en el vacío; si el medio no es el vacío, la intensidad de la fuerza disminuye (en denominador aparece factor $\kappa > 1$, constante dieléctrica).
- Es una fuerza **conservativa**.
- Cumple con el **Principio de Acción y Reacción** y el **Principio de Superposición**.



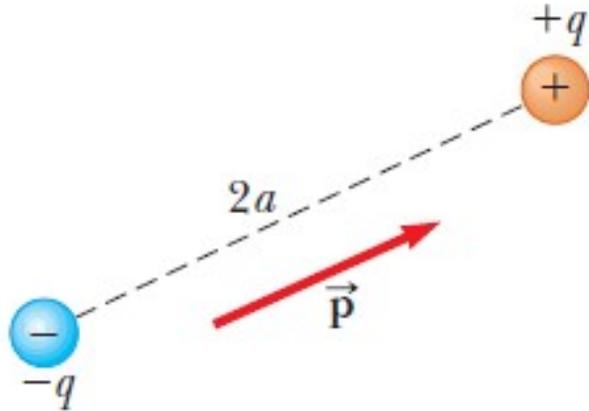
$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{2,1} + \vec{F}_{3,1} + \dots + \vec{F}_{N,1}$$

Campo eléctrico (E) en un punto en el espacio es la fuerza eléctrica F_E , que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en ese punto, dividida entre la carga de prueba.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_0}$$



REPASO CLASES PASADAS



Un **dipolo eléctrico** está formado por dos cargas de magnitudes iguales (q) y signos opuestos separados por una distancia $2a$. El momento del dipolo eléctrico \vec{p} está orientado desde $-q$ hacia $+q$. $p = 2aq = ql$

El dipolo eléctrico es un buen modelo de muchas moléculas.

Los átomos y moléculas neutros se comportan como dipolos cuando se colocan en un campo eléctrico externo.

Campo eléctrico de un dipolo: proporcional a p y varía como $1/r^3$.

Propiedades de un conductor en condiciones electrostáticas y aislado:

1. En el interior del conductor el campo eléctrico es cero, si el conductor es sólido o hueco.
2. Si un conductor aislado tiene carga, ésta reside en su superficie.
3. El campo eléctrico justo fuera de un conductor con carga es perpendicular a la superficie del conductor y tiene una magnitud σ/ϵ_0 , donde σ es la densidad de carga superficial en ese punto.
4. En un conductor de forma irregular, la densidad de carga superficial es máxima en aquellos puntos donde el radio de curvatura de la superficie es el menor.

REPASO CLASE PASADA

Energía potencial eléctrica: Dado un campo electrostático \vec{E} (coulombiano) y una carga q , definimos a la misma como:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_{r_a}^{r_b} q \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\Delta U = -(U_b - U_a) = U_a - U_b$$

El trabajo que realiza el campo eléctrico sobre la carga q cuando la misma se traslada desde el punto a al punto b , es igual al opuesto de la variación de la energía potencial eléctrica ($-\Delta U$)

Sea q positiva o negativa, se aplica la siguiente regla general: **U aumenta si la carga de prueba q se mueve en el sentido opuesto a la fuerza eléctrica $F=qE$; U disminuye si q se mueve en el mismo sentido que $F=qE$.**

Energía potencial eléctrica de dos cargas puntuales

$$W_{a \rightarrow b} = \int_{r_a}^{r_b} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

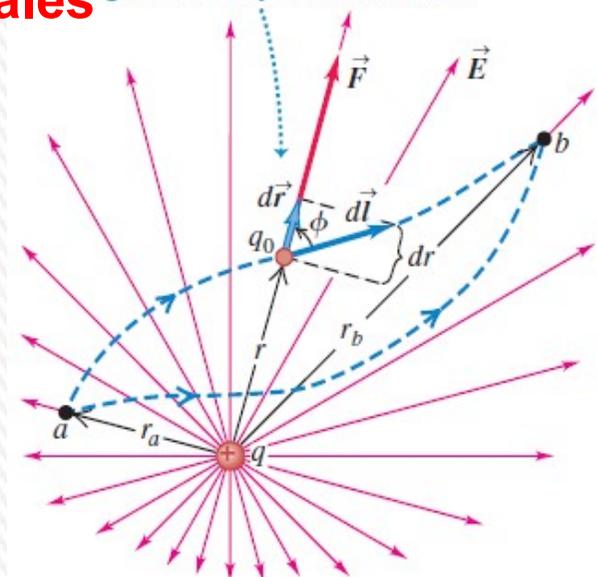
$$W_{a \rightarrow b} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right)$$

$$U = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r}$$

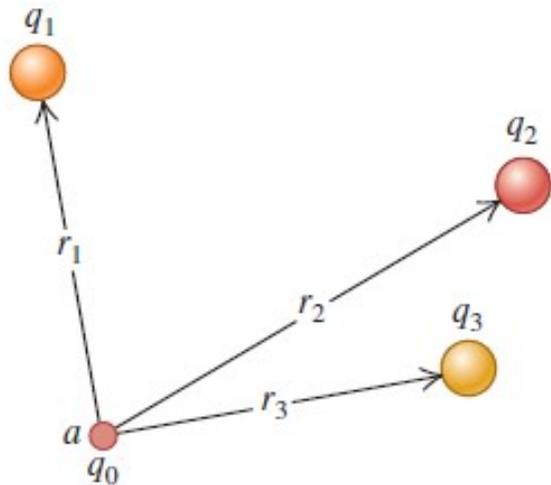
energía potencial eléctrica de dos cargas puntuales q y q_0

Independiente de los signos de q y q_0 . La energía potencial es positiva si las cargas q y q_0 tienen el mismo signo, y negativa si tienen signos opuestos, y cero si están infinitamente alejadas ($r = \infty$)

La carga de prueba q_0 se desplaza de a a b lo largo de una trayectoria arbitraria.



REPASO CLASE PASADA



la energía potencial asociada con la carga q_0 en el punto a debido a una distribución de cargas q_1, q_2, q_3, \dots vale:

$$U = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

INTERPRETACIÓN DE LA ENERGÍA POTENCIAL: la diferencia de energía potencial $U_a - U_b$ es igual al trabajo que efectúa la fuerza eléctrica cuando la partícula se desplaza de a a b .

Punto de vista alternativo (equivalente) $U_a - U_b$ se puede ver como el trabajo que debe efectuar una fuerza externa para desplazar lentamente la partícula desde b hasta a en contra de la fuerza eléctrica.



PREGUNTA RÁPIDA N° 1



Un protón se mueve desde el punto A hasta el punto B, en el mismo sentido y dirección que un campo eléctrico externo uniforme E .
En este movimiento:

- A) El trabajo realizado por el campo eléctrico es positivo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón aumenta.
- B) El trabajo realizado por el campo eléctrico es negativo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón aumenta.
- C) El trabajo realizado por el campo eléctrico es positivo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón disminuye.
- D) El trabajo realizado por el campo eléctrico es negativo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón disminuye.
- E) El trabajo realizado por el campo eléctrico es positivo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón no cambia.
- F) El trabajo realizado por el campo eléctrico es negativo y la energía potencial del sistema campo eléctrico-protón no cambia.

PREGUNTA RÁPIDA N° 2

Una partícula con una carga $Q = 5,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ está fija en el origen. Otra partícula con carga $q = -1,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ se mueve desde el punto $x = 5,0 \text{ cm}$, en el eje x , al punto $y = 5,0 \text{ cm}$ en el eje y .

El cambio en la energía potencial eléctrica del sistema vale:

A) $1,8 \times 10^{-4} \text{ J}$

B) $-1,8 \times 10^{-4} \text{ J}$

C) $9,0 \times 10^{-5} \text{ J}$

D) $-9,0 \times 10^{-5} \text{ J}$

E) 0

F) $-3,3 \times 10^{-6} \text{ J}$

G) Ninguno de los indicados

Continuemos con el concepto de potencial eléctrico...

POTENCIAL ELÉCTRICO

El **potencial eléctrico** V se define, en cualquier punto del campo eléctrico, como **la energía potencial electrostática U por unidad de carga asociada con una carga de prueba q_0 en ese punto:**

$$V = \frac{U}{q_0}$$

Unidad del potencial eléctrico en S.I.: **volt (V)** $1V = 1J/C$

en honor del científico italiano y experimentador eléctrico Alejandro Volta (1745-1827), y es igual a 1 joule por coulomb:

El trabajo realizado por unidad de carga por la fuerza eléctrica cuando un cuerpo con carga se desplaza de **a a b** es **igual al potencial en a (V_a) menos el potencial en b (V_b).**

$$\frac{W_{a \rightarrow b}}{q_0} = -\frac{\Delta U}{q_0} = -\left(\frac{U_b}{q_0} - \frac{U_a}{q_0}\right) = -(V_b - V_a) = V_a - V_b$$

La diferencia $V_a - V_b$ se llama **potencial de a con respecto a b** ; se abrevia como

$$V_{ab} = V_a - V_b$$

Con frecuencia, se denomina **diferencia de potencial entre a y b** o **voltaje**

V_{ab} , potencial de a con respecto a b , es igual al trabajo realizado por la fuerza eléctrica cuando una unidad de carga se desplaza de a a b .

El instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos puntos se llama **voltímetro**.

POTENCIAL ELÉCTRICO

Potencial eléctrico de una carga puntual:

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

r es la distancia de la carga puntual *q* al punto en que se evalúa el potencial.

Si *q* es positiva, el potencial que produce es positivo en todos los puntos; si *q* es negativa, produce un potencial negativo en todo lugar.

V es igual a cero en $r = \infty$, una distancia infinita de la carga puntual.

Potencial debido a un conjunto de cargas puntuales

$$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

Si tenemos una distribución continua de carga a lo largo de una línea, sobre una superficie o a través de un volumen, se divide la carga en elementos *dq*, y la suma en la ecuación anterior se convierte en una integral:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r}$$

r es la distancia que hay entre el elemento con carga *dq* y el punto del campo donde se desea calcular *V*.

El potencial en estas ecuaciones es igual a cero en puntos que están infinitamente lejos de todas las cargas.

POTENCIAL ELÉCTRICO

Diferencia de potencial eléctrico $V_B - V_A$: trabajo necesario realizado por un agente externo para mover en equilibrio (a velocidad constante) una carga de prueba q_0 desde el punto A al B, dividido el valor de la carga:

Si supongo que el punto A está muy alejado (en el infinito) y la distribución de carga es finita $\Rightarrow V_A = 0$

$$V_B - V_A = \frac{W_{A-B}^{EXT}}{q_0}$$

Interpretación física del potencial eléctrico: potencial eléctrico en un punto del espacio originado por una distribución de carga finita es igual al trabajo necesario que realiza un agente externo para mover una carga unitaria desde el infinito al punto considerado a velocidad constante.

Energía potencial eléctrica de un sistema de cargas puntuales-

trabajo que realiza un agente externo para formar el sistema de cargas, trayéndolas desde el infinito, a velocidad constante.

$$U_P = W_{\infty-P}^{EXT}$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i$$

V_i potencial en la posición de la carga i por todas las demás cargas.

La energía total de una configuración de cargas, es la suma de las energías de cada partícula.

SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

Superficies con igual *potencial eléctrico* en todos los puntos.

Si una carga q_0 se *desplaza de un punto a otro sobre una superficie equipotencial*, su energía potencial *eléctrica* q_0V *permanece constante*.

Ningún punto puede tener dos potenciales diferentes, por lo que las superficies equipotenciales de distintos potenciales nunca se tocan o intersecan.

Como la energía potencial no cambia a medida que una carga de prueba se mueve sobre una superficie equipotencial, el campo eléctrico no realiza trabajo sobre esa carga, por lo que debe ser perpendicular a la superficie en cada punto, de manera que la fuerza eléctrica q_0 *siempre es perpendicular al desplazamiento de una carga que se mueve sobre la superficie*.

Por lo tanto:

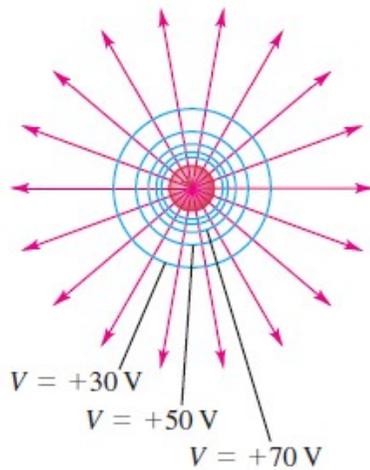
Las líneas de campo y las superficies equipotenciales siempre son perpendiculares entre sí.

SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

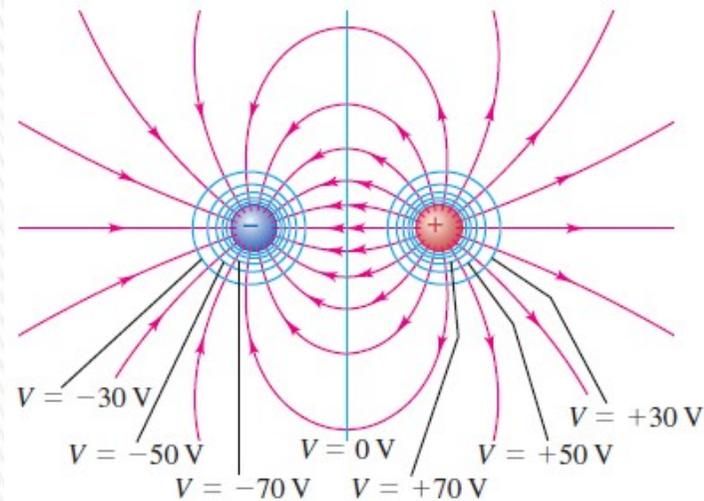
Secciones transversales de superficies equipotenciales (líneas azules) y líneas de campo eléctrico (líneas rojas) para diferentes arreglos de cargas puntuales.

Las diferencias de potencial son iguales entre superficies adyacentes.

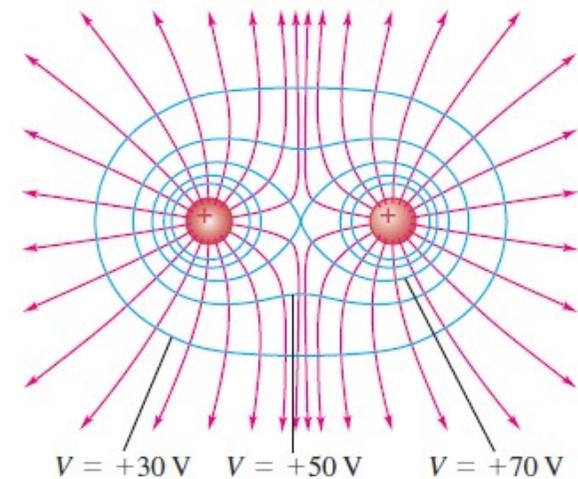
a) Una sola carga positiva



b) Dipolo eléctrico



c) Dos cargas iguales positivas



Las superficies equipotenciales reales son tridimensionales.

En cada cruce de una línea equipotencial con una línea de campo, las dos son perpendiculares.

Cálculo del potencial eléctrico a partir del campo eléctrico

Si conocemos el campo eléctrico se puede calcular el potencial eléctrico:

$$W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_a^b q_0 \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{dividiendo entre } q_0 \text{ se obtiene:}$$

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b E \cos \phi dl$$

El valor de $V_a - V_b$ es independiente de la trayectoria seguida de a a b , del mismo modo que el valor de $W_{a \rightarrow b}$ es independiente de la trayectoria.

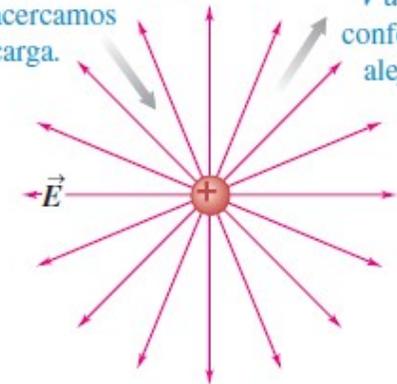
Una carga de prueba positiva q_0 experimenta una fuerza eléctrica en el sentido de dirigirse hacia valores menores de V .

Una carga de prueba negativa experimenta una fuerza en el sentido de dirigirse hacia valores mayores de V .

Es decir que una carga positiva tiende a “caer” de una región de potencial elevado a otra de menor potencial. Lo contrario se cumple para una carga negativa.

a) Una carga puntual positiva

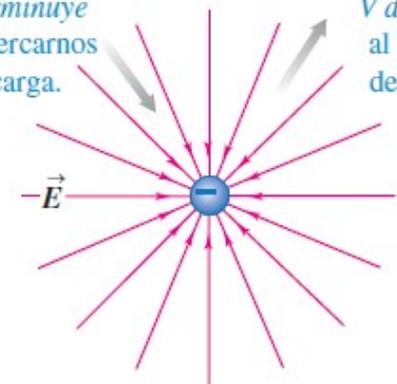
V aumenta conforme nos acercamos a la carga.



V disminuye conforme nos alejamos de la carga.

b) Una carga puntual negativa

V disminuye al acercarnos a la carga.



V disminuye al alejarnos de la carga.

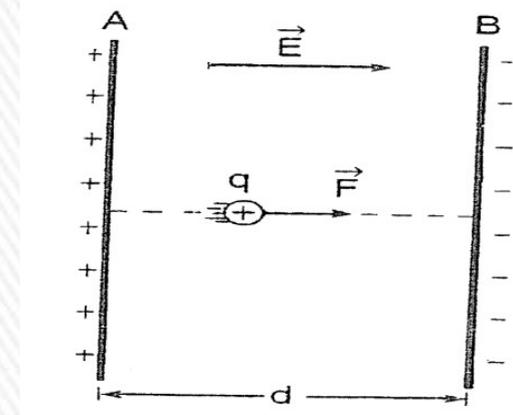
Cálculo del potencial eléctrico a partir del campo eléctrico

Como podemos escribir que: $V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$

entonces si el campo eléctrico \vec{E} es uniforme:

$$V_B - V_A = -\vec{E} \cdot \Delta\vec{s}$$

$$|\Delta V| = E \cdot d$$



POTENCIAL DE UNA ESFERA: Se puede probar que el potencial eléctrico de una esfera uniformemente cargada, para puntos exteriores a la misma, es el mismo que crea una carga puntual, de igual carga, colocada en su centro.

El **electrón-volt (eV)**: es una unidad de energía dada por el producto de la carga e por el potencial V .

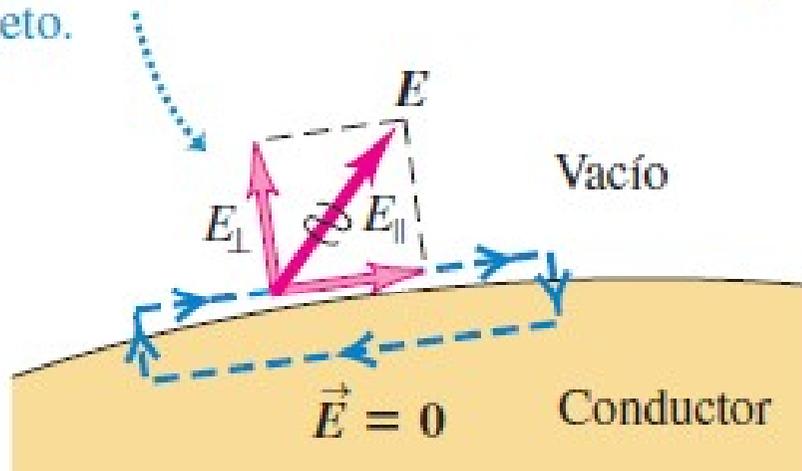
$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Cuando una partícula con carga e se mueve a través de una diferencia de potencial de 1 volt, el cambio en la energía potencial es 1 eV.

EQUIPOTENCIALES Y CONDUCTORES

Un campo eléctrico imposible

Si el campo eléctrico inmediatamente afuera de un conductor tuviera una componente tangencial E_{\parallel} , una carga podría moverse en un circuito cerrado realizando un trabajo neto.



Dentro del conductor, en condiciones electrostáticas el campo eléctrico es nulo. En todos los puntos de la superficie de un conductor, el campo eléctrico debe ser perpendicular a la superficie.

Si tuviera una componente tangencial, se realizaría una cantidad neta de trabajo sobre una carga de prueba al moverla en una trayectoria como la que se ilustra, lo que es imposible porque la fuerza eléctrica es conservativa.

Como:
$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

y $E=0$ en el interior de un conductor, se concluye que:

Cuando todas las cargas están en reposo (condición electrostática), el volumen completo de un conductor sólido tiene el mismo potencial.

El volumen del conductor es un *volumen equipotencial*¹⁵

PREGUNTA RÁPIDA N° 3

Una esfera de cobre tiene una carga de $Q = 2,00 \times 10^{-6} \text{ C}$ y un potencial eléctrico de 500 V (se consideran condiciones electrostáticas y que el potencial en el infinito vale 0).

Entonces el potencial eléctrico en el centro de la esfera vale:

A) $0,00 \text{ V}$

B) -500 V

C) 500 V

D) Falta información para poder determinarlo (el radio de la esfera)

E) Ninguna de las opciones indicadas.



PREGUNTA RÁPIDA N° 4

Dos esferas conductoras están muy separadas entre sí en relación a sus tamaños.

La esfera A, tiene un radio R y una carga Q , mientras que la esfera B tiene un radio $2R$ y está descargada.

Si se conectan mediante un cable largo, entonces...

A) ambas esferas tienen el mismo potencial eléctrico.

B) la esfera B tiene el doble de potencial eléctrico que la A.

C) la esfera B tiene la mitad de potencial eléctrico que la A.

D) ambas esferas quedan con la misma carga.

E) toda la carga se disipa.

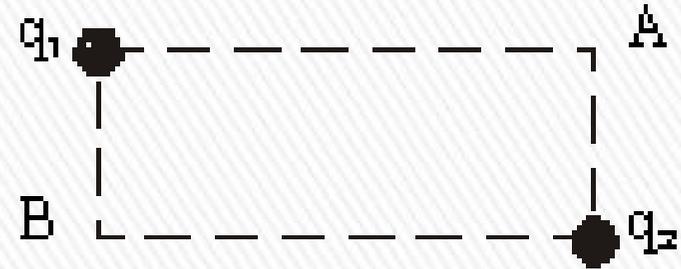


EJEMPLO-Ejercicio 1.2.1

En el rectángulo mostrado en la figura, los lados tienen una longitud de $a = 5,0$ cm y $l = 15$ cm, $q_1 = -5,0$ μC y $q_2 = +2,0$ μC .

a) ¿Cuánto trabajo externo se requiere para mover a una tercera carga $q_3 = +3,0$ μC desde B hasta A a lo largo de una diagonal del rectángulo?

b) En este proceso, ¿se convierte el trabajo externo en energía potencial electrostática o viceversa?



El trabajo que debe realizar un agente externo es igual y opuesto al que realiza el campo eléctrico:

$$W_{A \rightarrow B}^{campo\ E} = -W_{A \rightarrow B}^{Ext.} = W_{B \rightarrow A}^{Ext.}$$

Por lo tanto:
$$W_{B \rightarrow A}^{Ext.} = U_A - U_B = q_3(V_A - V_B)$$

$$V_A = k_E \frac{q_1}{l} + k_E \frac{q_2}{a} = k_E \left(\frac{q_1}{l} + \frac{q_2}{a} \right)$$

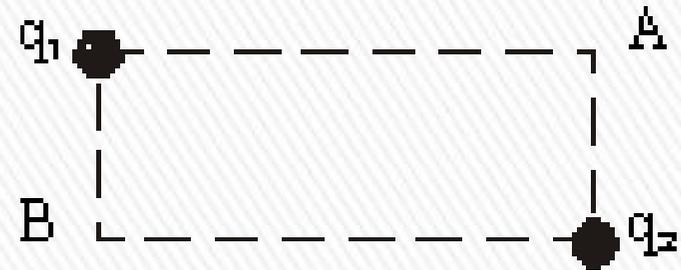
$$V_A = (8,988 \times 10^9) \left(\frac{-5,00 \times 10^{-6}}{0,150} + \frac{2,00 \times 10^{-6}}{0,0500} \right) = 59.920 \text{ V}$$

EJEMPLO-Ejercicio 1.2.1

En el rectángulo mostrado en la figura, los lados tienen una longitud de $a = 5,0 \text{ cm}$ y $l = 15 \text{ cm}$, $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$ y $q_2 = +2,0 \mu\text{C}$.

a) ¿Cuánto trabajo externo se requiere para mover a una tercera carga $q_3 = +3,0 \mu\text{C}$ desde B hasta A a lo largo de una diagonal del rectángulo?

b) En este proceso, ¿se convierte el trabajo externo en energía potencial electrostática o viceversa?



$$V_B = k_E \frac{q_1}{a} + k_E \frac{q_2}{l} = k_E \left(\frac{q_1}{a} + \frac{q_2}{l} \right)$$

$$V_B = (8,988 \times 10^9) \left(\frac{-5,00 \times 10^{-6}}{0,0500} + \frac{2,00 \times 10^{-6}}{0,150} \right) = -778.960 \text{ V}$$

$$W_{B \rightarrow A}^{Ext.} = q_3 (V_A - V_B) = (3,00 \times 10^{-6}) (59920 - (-778960)) = 2,5166 \text{ J}$$

$$W_{B \rightarrow A}^{Ext.} = 2,52 \text{ J}$$

b) El agente externo realiza trabajo positivo, llevando una carga positiva q_3 desde un punto de menor potencial a otro de mayor potencial, por tanto se convierte trabajo en energía potencial