03-POTENCIAL ELÉCTRICO

Los procesos que suceden durante las tormentas eléctricas generan grandes diferencias de potencial eléctrico entre una nube y la tierra. El resultado son las descargas eléctricas conocidas como rayos. Observe a la izquierda que un canal descendente del rayo (guía o líder escalonado) está a punto de hacer contacto con un canal desde el suelo (una descarga de retorno).

INTRODUCCIÓN

Empezaremos a tratar la **energía asociada con las interacciones eléctricas**: elemento indispensable en nuestra sociedad tecnológica.

En el curso pasado vimos los conceptos de *trabajo y energía en el contexto de la mecánica; ahora se combinarán estos conceptos* con lo que hemos aprendido sobre cargas eléctricas, fuerzas eléctricas y campos eléctricos.

Cuando una partícula con carga se mueve en un campo eléctrico, este último ejerce una fuerza que efectúa un *trabajo sobre la partícula. Este trabajo siempre se puede* expresar en términos de la energía potencial eléctrica.

Así como la energía potencial gravitacional depende de la altura de una masa sobre la superficie terrestre, la **energía potencial eléctrica** depende de la posición que ocupa la partícula con carga en el campo eléctrico.

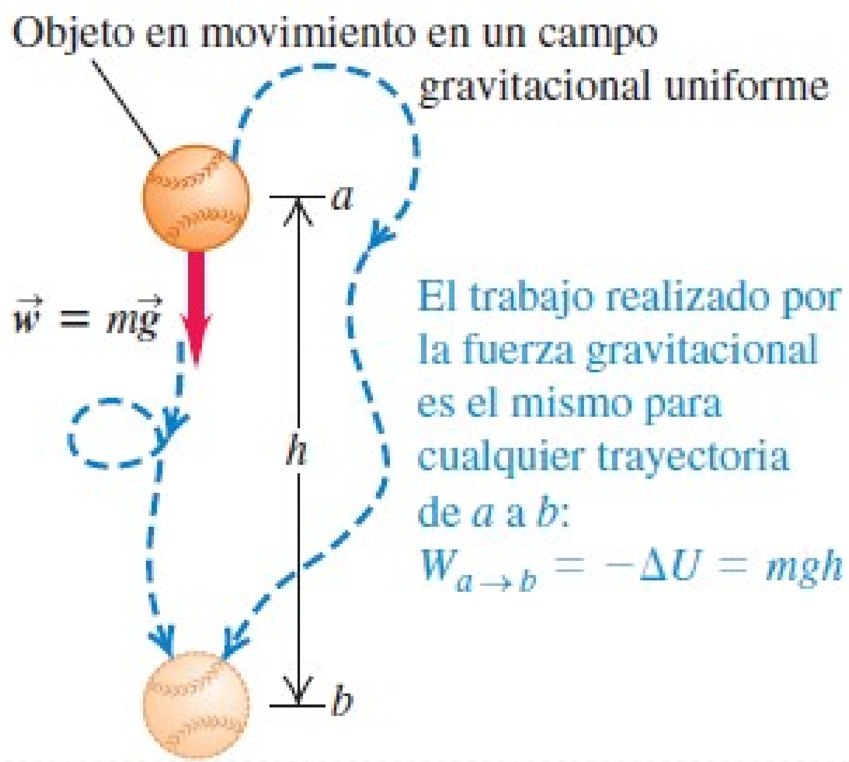
Describiremos la energía potencial eléctrica utilizando un concepto nuevo, llamado ***potencial eléctrico o simplemente potencial***.

*En el estudio de circuitos, llamaremos **voltaje a una diferencia de potencial entre un punto y otro**.*

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Habíamos mencionado que la fuerza eléctrica (coulombiana) era una fuerza conservativa, por tanto se le puede asociar una **energía potencial eléctrica**, y el trabajo realizado no dependerá de la trayectoria, sino que solamente del punto inicial y final.

Trabajo en campo gravitatorio uniforme: una pelota se traslada desde el punto a, con energía potencial gravitatoria $U_{ga} = mgh_a$, al punto b: con $U_{gb} = mgh_b$.
El trabajo que realiza el peso vale:
$W_{a\to b} = mgh = mg(h_a - h_b) = U_{ga} - U_{gb} = -\Delta U_g$



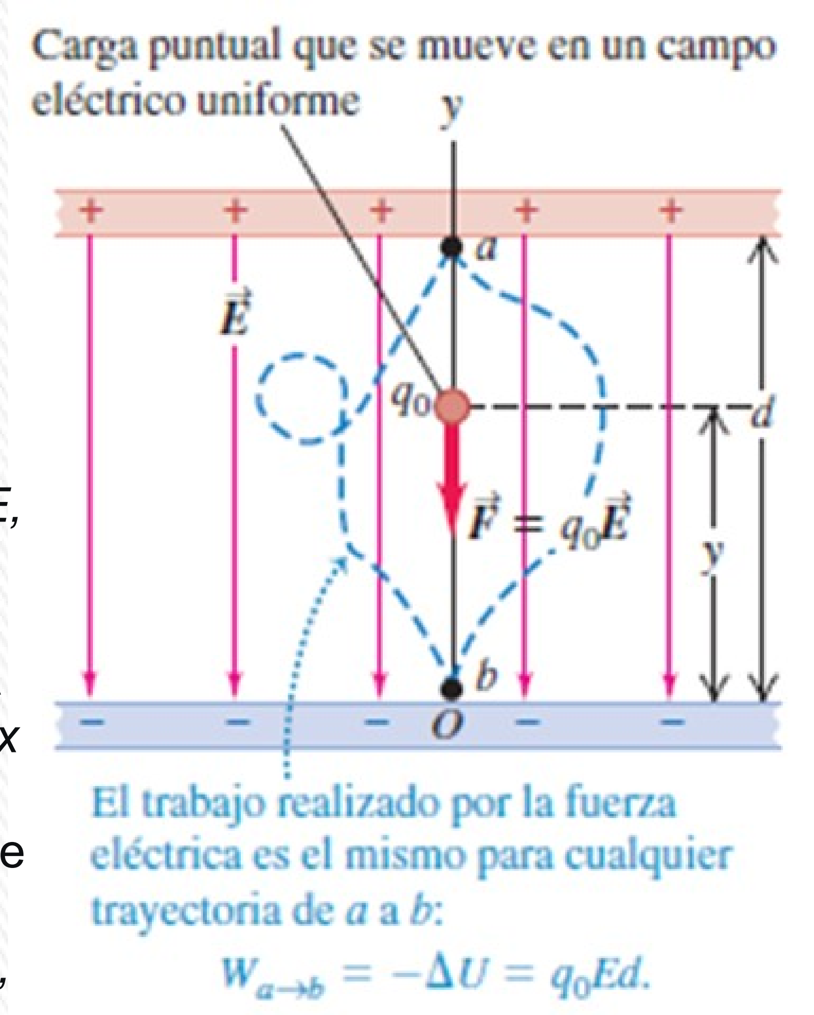
En general si **F** es una fuerza conservativa el trabajo realizado por **F** se puede expresar en términos de una **energía potencial U**, y se cumple:

$$W_{A\to B} = U_A - U_B = -(U_B - U_A) = -\Delta U$$

Si $W_{A\to B}$ es positivo, $U_A > U_B$, la energía potencial disminuye, esto es lo que sucede cuando una pelota cae por efecto del campo gravitatorio terrestre.
En cambio, cuando se lanza hacia arriba la fuerza gravitatoria realiza un trabajo negativo y la energía potencial aumenta.

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA EN CAMPO UNIFORME

Par de placas metálicas paralelas con carga generan un campo eléctrico uniforme descendente de magnitud *E*.



El trabajo realizado por el campo eléctrico es el producto de la magnitud de la fuerza y la componente de desplazamiento en la dirección (descendente) de la fuerza:

$$W_{A\to B} = F.d = q_0 E d$$

Componente *y de la fuerza eléctrica,* $F_y = -q_0E$*, es constante, no hay componente x o z. Análogo a la fuerza gravitacional que actúa sobre una masa m* cerca de la superficie de la Tierra: $F_y = -mg$ *constante, con componentes x y z son iguales a cero. A partir de esta analogía se* puede concluir que la fuerza ejercida sobre q_0 *por el campo eléctrico uniforme en la* figura es *conservativa, igual que la fuerza gravitacional.*

Esto significa que el trabajo $W_{a\to b}$ *efectuado por el campo es independiente de la trayectoria que sigue la* partícula de *a a b. Este trabajo puede representarse con una* ***función de energía potencial U.***

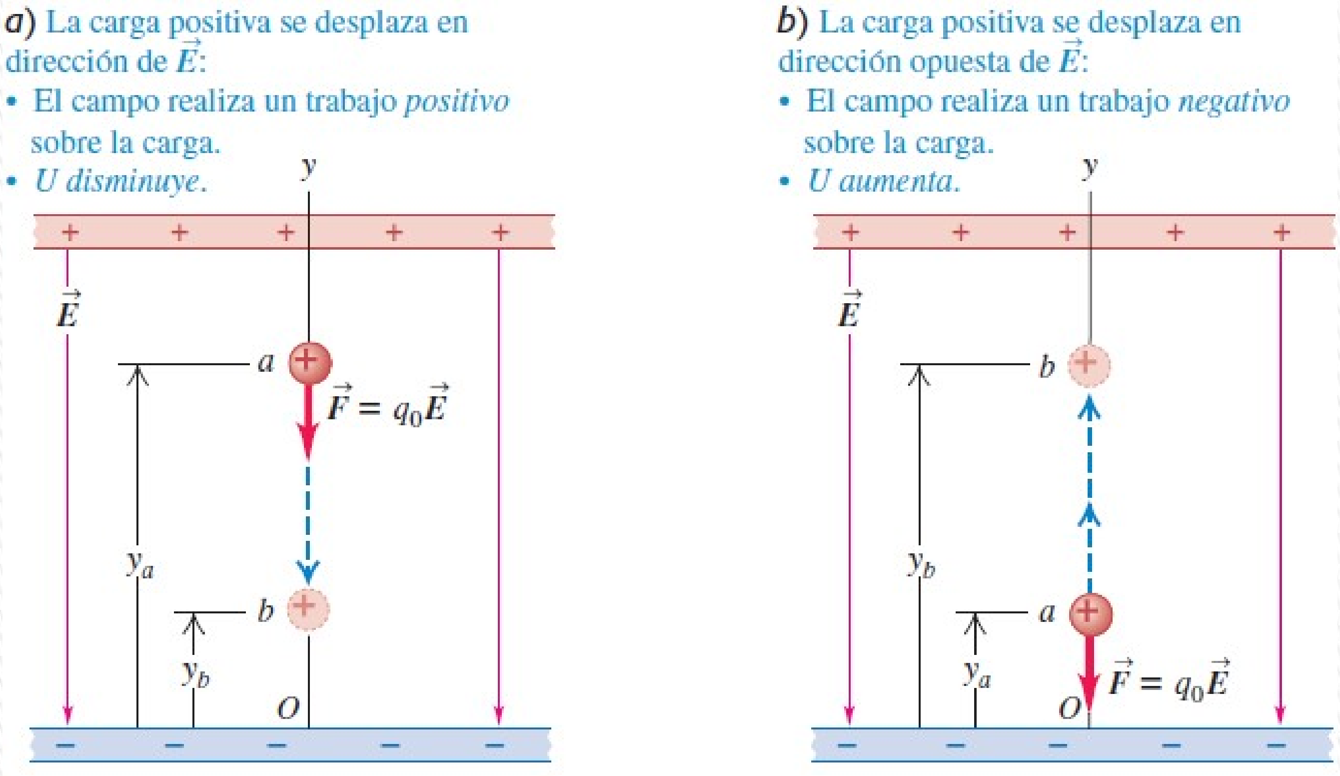
ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA EN CAMPO UNIFORME

La energía potencial para la fuerza gravitacional $F_y = -mg$ *fue* $U = mgy$*; por consiguiente,* la energía potencial para la fuerza eléctrica $F_y = -q_0E$ *es:* $\mathbf{U = q_0Ey}$

Cuando la carga de prueba se mueve de la altura y_a *a la altura* y_b*, el trabajo realizado* sobre la carga por el campo está dado por

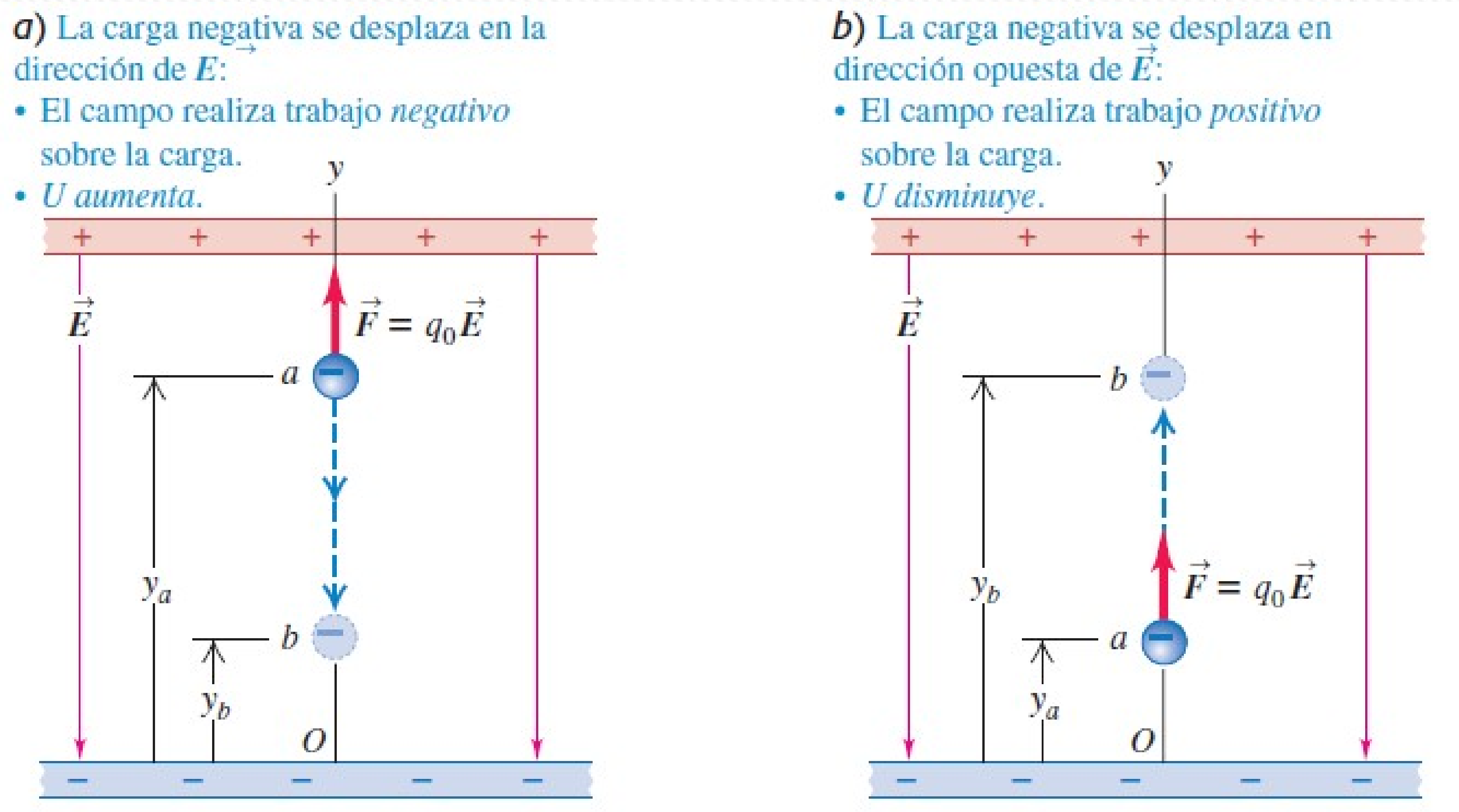
$$W_{a\to b} = -\Delta U = -(U_b - U_a) = -(q_0Ey_b - q_0Ey_A) = q_0E(y_A - y_b)$$

Si $y_a > y_b$ la carga positiva q_0 se mueve hacia abajo, en el mismo sentido que **E**, el desplazamiento es en el mismo sentido que $F = q_0E$, se realiza trabajo positivo y U disminuye.



ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA EN CAMPO UNIFORME

Si la carga de prueba q_0 *es negativa, la energía potencial aumenta cuando se mueve* a favor del campo, y disminuye cuando se mueve en contra del campo.

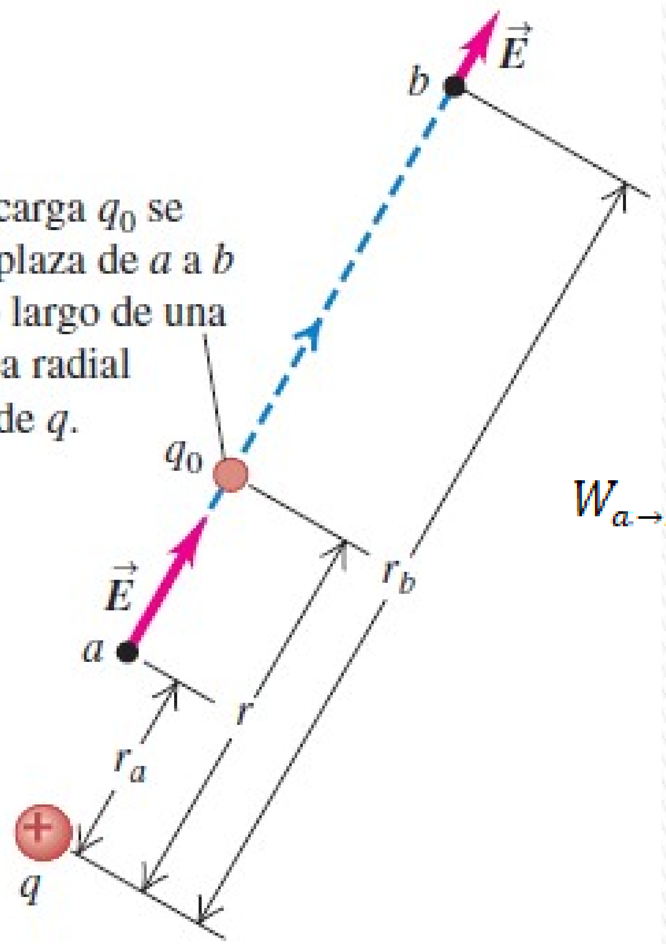


Sea q_0 positiva o negativa, se aplica la siguiente regla general: ***U aumenta si la carga de prueba q_0 se mueve en el sentido opuesto a la fuerza eléctrica $F=q_0E$****;*

U disminuye si q_0 se mueve en el mismo sentido que ***$F=q_0E$****.*

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA DE DOS CARGAS PUNTUALES

Vamos calcular el trabajo realizado sobre una carga de prueba q_0 *que se mueve en el campo eléctrico generado por una sola carga* puntual estacionaria *q.*



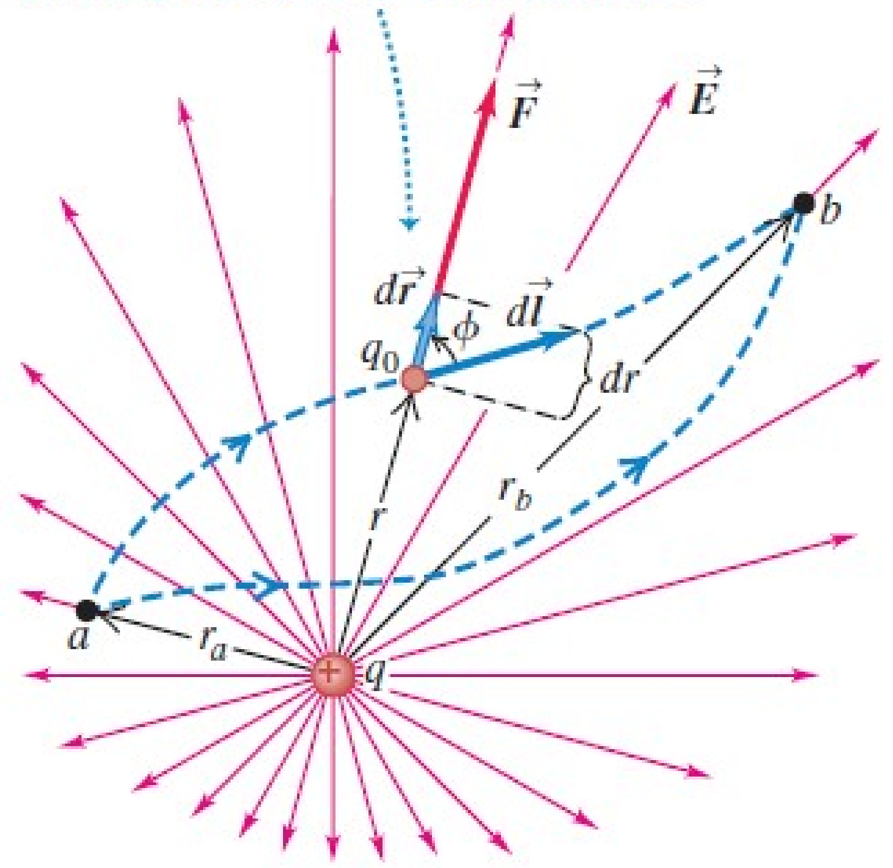
En primer lugar vemos un desplazamiento a lo largo de una línea *radial.*
La fuerza sobre q_0 *está dada por la ley de Coulomb.*
La fuerza ***no es constante*** *durante el desplazamiento, y se tiene que integrar para calcular* el trabajo.

$$W_{a\to b} = \int_{r_a}^{r_b} F_r dr = \int_{r_a}^{r_b} \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dr = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r^2}$$

$$W_{a\to b} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(-\frac{1}{r}\right)\Bigg|_{r_a}^{r_b} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right)$$

El trabajo efectuado por la fuerza eléctrica para esta trayectoria particular depende solo de los puntos en los extremos.

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA DE DOS CARGAS PUNTUALES



Consideremos ahora un desplazamiento más general en el que *a y b no están en la misma línea radial.*

$$W_{a\to b} = \int_{r_a}^{r_b} F\cos\phi\, dl = \int_{r_a}^{r_b} \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cos\phi\, dl$$

Pero: cosΦ dl = dr

Es decir, el trabajo realizado durante un desplazamiento ***dl*** pequeño depende solo del cambio *dr de la distancia r entre las* cargas, la cual es la *componente radial del desplazamiento* .

Por tanto el resultado de la integral, para un desplazamiento cualquiera, será el mismo que para el desplazamiento radial entre *a* y *b*.

$$W_{a\to b} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right)$$

Esto es una consecuencia de que fuerza eléctrica coulombiana es **conservativa**.

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA DE DOS CARGAS PUNTUALES

Como: $W_{A\to B} = U_A - U_B = -(U_B - U_A) = -\Delta U$

Y además: $$W_{a\to b} = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b}\right)$$

Podemos definir que la energía potencial cuando q_0 está a una distancia r_a de *q* vale: $U_a = \dfrac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r_a}$ análogamente $U_b = \dfrac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r_b}$

La energía potencial *U cuando la carga de prueba* q_0 *está a cualquier distancia r de la carga q es*

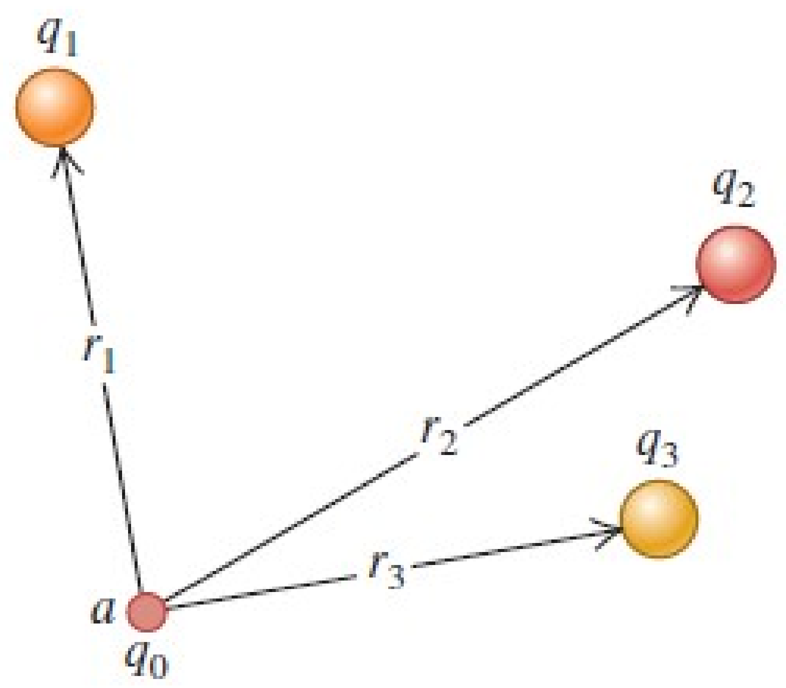
$$U = \frac{qq_0}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

energía potencial eléctrica de dos cargas puntuales *q y* q_0

Válido independientemente 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

La energía potencial siempre se define en relación con algún punto de referencia donde *U = 0. U = 0 si q y* q_0 *están infinitamente* alejadas y *r* = ∞ *Por lo tanto, U representa el trabajo que realizaría el campo* de *q sobre la carga de prueba* q_0 *si esta última se desplazara de una distancia inicial r* al infinito.

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA DE VARIAS CARGAS PUNTUALES



Carga q_0 que se desplaza en una región donde hay un campo **E** creado por varias cargas.

El campo eléctrico total en cada punto es la suma vectorial de los campos debidos a las cargas individuales, y el trabajo total realizado sobre q_0 durante cualquier desplazamiento es la suma de las contribuciones de las cargas individuales.

Por lo tanto, 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,… vale:

$$U = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \cdots\right) = \frac{q_0}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

El trabajo efectuado sobre la carga q_0 cuando se desplaza de *a a b a lo largo de cualquier trayectoria* es igual a la diferencia U_a - U_b *entre las energías potenciales cuando* q_0 *está en a* y luego en *b.*

ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA DE UN ARREGLO DE CARGAS

Como *cualquier distribución de carga se puede considerar como un conjunto de cargas* puntuales, y como a éstas siempre es posible encontrar una función de la energía potencial para *cualquier campo eléctrico estático, tenemos que:* **para todo campo eléctrico debido a una distribución de carga estática, la fuerza ejercida por ese campo es conservativa.**

Las ecuaciones anteriores muestran que *U es igual a cero cuando todas las distancias* r_1, r_2, *… son infinitas, es decir, cuando la carga de prueba* q_0 *está muy lejos de* todas las cargas que producen el campo.

También hay energía potencial implicada en el arreglo de las cargas.
Si se comienza con las cargas q_1, q_2, q_3, …, todas separadas entre sí por distancias infinitas, y luego se acercan de manera que la distancia entre q_i y q_j *sea* r_{ij}, *la energía potencial total U es la suma de las energías potenciales* de interacción de cada par de cargas.

La suma se extiende sobre todos los *pares de cargas; no se permite que i = j (porque* eso sería la interacción de una carga consigo misma), y solo se incluyen términos con *i < j para garantizar que cada par de cargas se tome en cuenta solo una vez.*

$$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{i<j}\frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

Se toma en cuenta la interacción entre q_3 y q_4, *se incluye un término con i = 3 y j = 4, pero no* un término con *i = 4 y j = 3.*

INTERPRETACIÓN DE LA ENERGÍA POTENCIAL

Vimos que cuando una partícula se desplaza del punto *a* al punto *b, el* ***trabajo que realiza sobre*** **ella por el campo eléctrico** es $W_{a\rightarrow b} = U_a - U_b$.
Por lo tanto, ***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.***
Si $U_a > U_b$*, el campo realiza trabajo positivo sobre* la partícula conforme “cae” de un punto de mayor energía potencial (*a) a otro con* menor energía potencial (*b).*

Punto de vista alternativo (pero equivalente) considerar cuánto trabajo se necesita para “subir” la partícula desde un punto *b, con* energía potencial U_b*, hasta a, con una energía potencial* mayor U_a *(como empujar dos cargas positivas para acercarlas).*
Para mover la partícula lentamente (de manera que no se le imparta ninguna energía cinética), es necesario ejercer una fuerza externa adicional que es igual y opuesta a la fuerza del campo eléctrico y realiza un trabajo positivo.
Entonces $U_a - U_b$ ***se define entonces como el trabajo que debe efectuar una fuerza externa para desplazar lentamente la partícula desde b hasta a en contra de la fuerza eléctrica.***
Esto también funciona si $U_a < U_b$*, lo que corresponde a “bajar” la partícula (ejemplo al*ejar dos cargas positivas una de otra)
En este caso, $U_a - U_b$ *de nuevo es igual al trabajo* realizado por la fuerza externa, pero ahora este trabajo es negativo.

POTENCIAL ELÉCTRICO

El **potencial eléctrico *V*** *se define,* en cualquier punto del campo eléctrico, como **la energía potencial *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).

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

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**

Vab, el 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: $$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r}$$

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 =∞, una distancia infinita de la carga puntual.*

Potencial debido a un conjunto de cargas puntuales $$V = \frac{U}{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_i \frac{q_i}{r_i}$$

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: $$V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{dq}{r}$$

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.*
Se verá luego casos en que la distribución de carga misma se extiende al infinito.
En tales casos se verá que no se puede establecer *V = 0 en el infinito*

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, divido el valor de la carga:

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

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

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.

Nota: a través de cualquier trayectoria, ya que la fuerza eléctrica es conservativa

Potencial eléctrico de una carga puntual: $V(r) = k_E \frac{q}{r}$

Potencial eléctrico de un conjunto de cargas puntuales: $V(r) = k_E \sum_i \frac{q_i}{r_i}$

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

La energía electrostática U de un sistema de *n* cargas puntuales: $U = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} q_i V_i$

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.

POTENCIAL ELÉCTRICO

Resumiendo, trabajo realizado por un agente externo para ir desde el punto A hasta el punto B:

$$W_{A-B}^{EXT} = U_B - U_A = q(V_B - V_A) = q\Delta V$$

(es el trabajo realizado por el agente externo, que es opuesto al realizado por el campo **E**)

Trabajo realizado por el campo eléctrico:

$$W_{A\rightarrow B}^{Eléctrico} = -W_{A\rightarrow B}^{Externo} = q\,(V_A - V_B)$$

SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

Son superficies sobre las que el *potencial eléctrico V es el mismo* en todos los puntos.

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

En una región en la que existe un campo eléctrico, es posible construir una superficie equipotencial en cualquier punto.

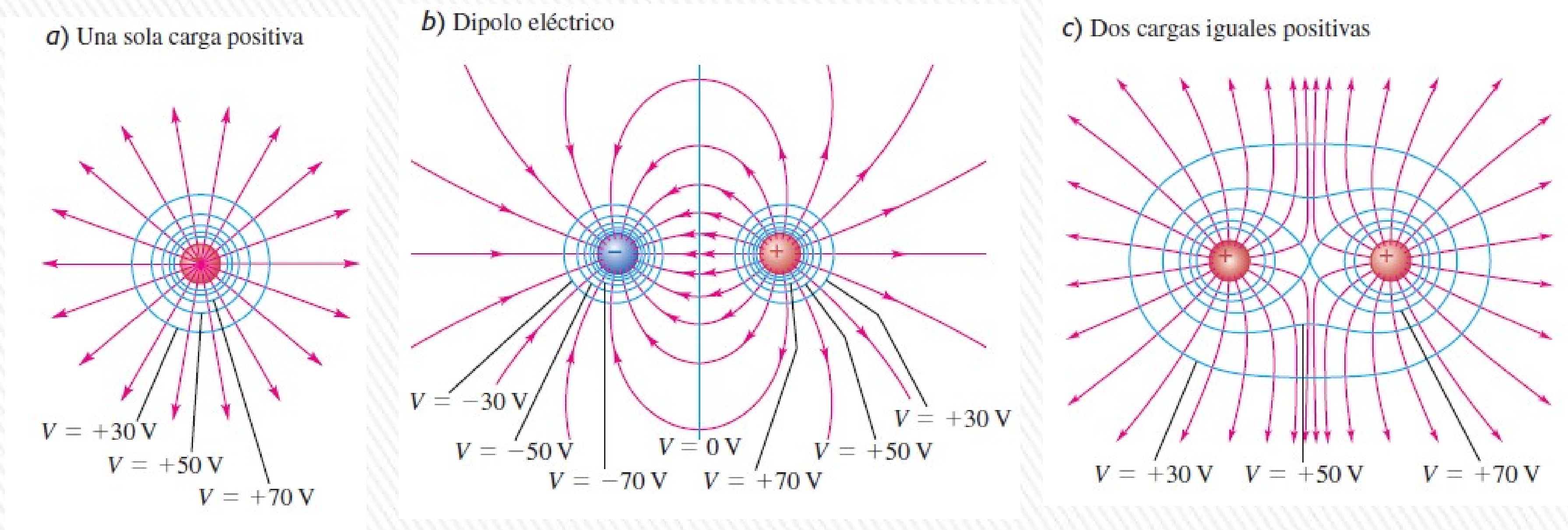
Ningún punto puede tener dos potenciales diferentes, por lo que las superficies equipotenciales de distintos potenciales nunca se tocan o intersecan.

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*.

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 eléctricas (líneas rojas) para diferentes arreglos de cargas puntuales. Las diferencias de potencial son iguales entre superficies adyacentes.



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

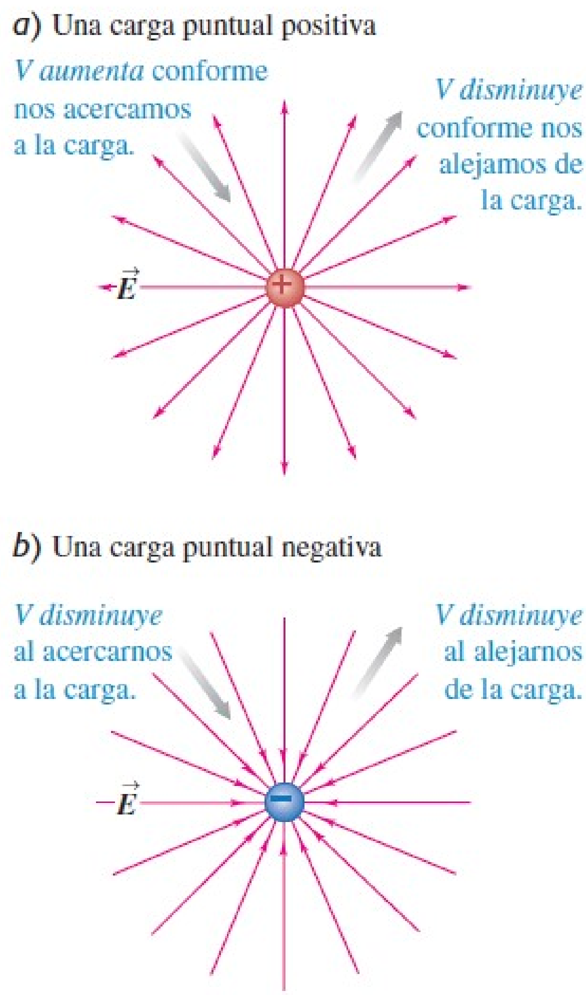
Si conocemos el campo eléctrico se puede calcular el potencial eléctrico, *La fuerza* ***F*** *sobre una carga de prueba q_0 se escribe como* ***F*** = q_0 ***E*** por lo que, el trabajo realizado por la fuerza eléctrica conforme la carga de prueba se desplaza de *a a b está dado por:*

$$W_{a\to b} = \int_a^b \overline{\boldsymbol{F}} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_a^b q_0 \overline{\boldsymbol{E}} \cdot d\boldsymbol{l}$$

Dividiendo entre q_0 *se obtiene:*

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

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



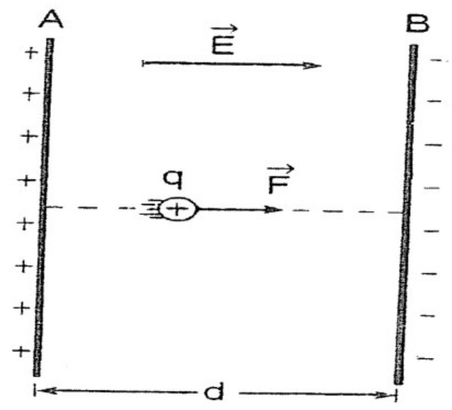
Una carga de prueba positiva q_0 *experimenta una fuerza eléctrica en el sentido* de dirigirse hacia valores menores de *V.*
Una carga de prueba negativa experimenta una fuerza en el sentido de dirigirse hacia valores mayores de *V.*
Así, una carga positiva tiende a “caer” de una región de potencial elevado a otra de menor potencial.
Lo contrario se cumple para una carga negativa.

Cálculo del potencial eléctrico a partir del campo eléctrico

$$V_a - V_b = -\int_b^a \overline{E} \cdot d\overline{l}$$

A partir de esta ecuación, V_a - V_b = V_{ab}, *el potencial* de *a con respecto a b, es igual al trabajo realizado por unidad de carga por una fuerza* externa (contraria a la fuerza debido al campo eléctrico) para desplazar una unidad de carga de *b a a.*

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



entonces si el campo eléctrico **E** es uniforme:

$$V_B - V_A = -\overline{E}.\Delta\overline{s}$$

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 eV= 1,602×10^{-19} 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.*

Ionización y descarga de una corona

Las moléculas de aire se *ionizan y el aire se convierte en* un conductor a una magnitud de campo eléctrico de aproximadamente 3×10^6 V/m. (*resistencia dieléctrica del aire*).

Para una **esfera**, tenemos que el potencial y el campo eléctrico sobre la sobre la superficie valen:

$$V_R = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R} \qquad E_R = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{R^2} \qquad V_R = E_R R$$

Si E_m representa la magnitud de campo eléctrico a la que el aire se vuelve conductor (*resistencia dieléctrica del aire), entonces el potencial máximo* V_m que se puede aplicar a un conductor esférico es: $V_m = E_m . R$

Para una esfera conductora de 1 cm de radio en el aire,
$V_m = (10^{-2}\ m)(3\times10^6\ V/m)$ = 30,000 V.
Ninguna cantidad de "carga" puede elevar el potencial de una esfera conductora de este tamaño en el aire más allá de 30,000 V, aproximadamente; si se intenta aumentar el potencial más allá de esto agregando carga adicional, se provocaría que el aire circundante se ionizara y se convirtiera en conductor, y la carga adicional escaparía al aire

Ionización y descarga de una corona

Esto explica lo que sucede con un conductor cargado de radio de curvatura muy *pequeño, como un objeto afilado o un alambre fino.*

Como el potencial máximo es proporcional al radio, incluso potenciales relativamente pequeños aplicados a puntas agudas en el aire producen campos lo suficientemente elevados justo afuera de las puntas para ionizar el aire circundante y convertirlo en un conductor.

La corriente resultante y el resplandor asociado a ella (visible en un cuarto oscuro) se llama ***descarga corona.***

En situaciones en que es importante *evitar que exista una corona, se usan conductores* de radio grande (esfera metálica en el extremo de las antenas de radio para automóviles para evitar estática que provocaría la descarga corona).

Otro ejemplo: extremo romo de los pararrayos metálicos. Si hay un exceso de carga en la atmósfera, como ocurre durante las tormentas eléctricas, en el extremo romo se acumula una cantidad sustancial de carga del signo contrario. Como resultado, cuando la carga atmosférica se descarga a través de relámpagos, tiende a ser atraída hacia el pararrayos y no hacia otras estructuras cercanas que podrían resultar dañadas.

Un pararrayos con extremo agudo permitiría que se acumulara menos carga y por ello sería menos eficaz.

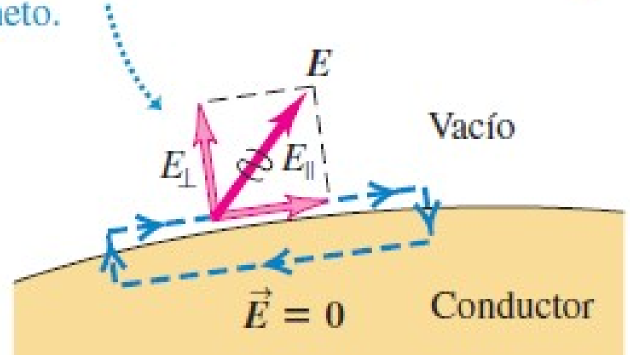
EQUIPOTENCIALES Y CONDUCTORES

Cuando todas las cargas están en reposo (condición electrostática), la superficie de un conductor siempre es una superficie equipotencial.

Como el campo eléctrico siempre es perpendicular a una superficie equipotencial, el enunciado se puede demostrar si se prueba que **cuando todas las cargas están en reposo, el campo eléctrico justo afuera de un conductor debe ser perpendicular a la superficie en cada punto.**

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.



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

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*