

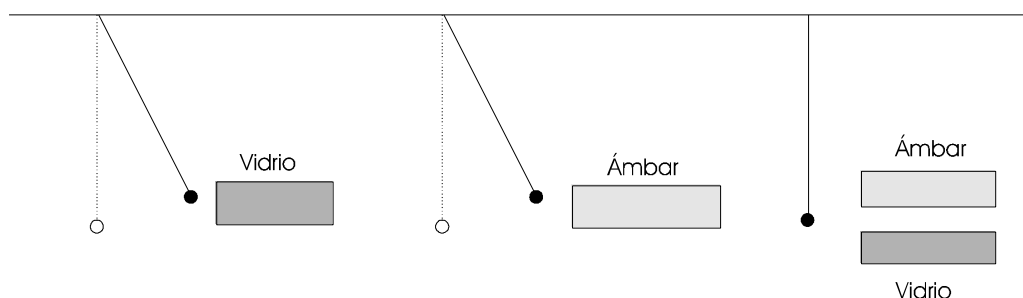


Campo Eléctrico.

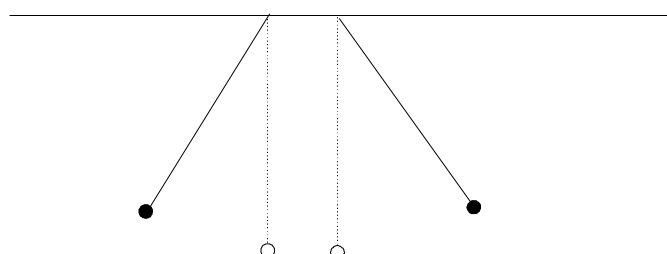
- Carga eléctrica: Principio de conservación.
- Ley de Coulomb.
- Campo eléctrico. Líneas de campo.
- Distribuciones discretas de cargas.
- Principio de superposición.
- Energía potencial eléctrica.
- Potencial eléctrico. Superficies equipotenciales.
- Analogías y diferencias entre los campos gravitatorio y eléctrico

Introducción.

Si frotamos una barra de vidrio con un paño de seda, y acercamos la barra de vidrio a una bolita de corcho que cuelga de un hilo, vemos como la barra de vidrio atrae a la bolita de corcho. Si repetimos la misma experiencia con una barra de ámbar se observa el mismo efecto. Pero si acercamos las dos barras sin tocarse a la bolita, la bolita no se mueve. Deducimos de estos hechos que tanto el vidrio como el ámbar han adquirido cierta cualidad, y esta cualidad en el ámbar es opuesta a la del vidrio. A esta cualidad la llamamos *carga eléctrica*, y decimos que existen dos tipos de carga eléctrica, *positiva* (vidrio) y *negativa* (ámbar). Estos nombres son absolutamente arbitrarios.



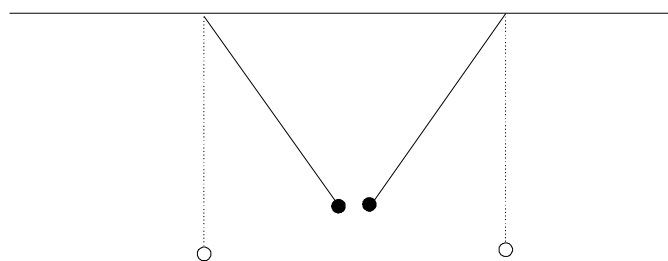
Supongamos que tenemos ahora dos péndulos eléctricos próximos entre si, y tocamos cada una de las bolitas de corcho con la barra de vidrio electrizado, con lo que parte de la carga de la barra de vidrio pasa a las bolitas. Se observa que las bolas se repelen.



Pero si tocamos una bolita con vidrio electrizado y la otra bolita con ámbar electrizado observamos que las bolitas se atraen.



Campo eléctrico



De estos dos hechos podemos afirmar que *cargas del mismo signo se repelen* y *cargas de distinto signo se atraen*.



Origen de las cargas

Franklin, después de numerosas observaciones experimentales, descubrió que cuando se frota dos cuerpos, si uno de ellos se electriza positivamente, el otro adquiere, necesariamente, carga negativa. Así, cuando se frota vidrio con seda, además de adquirir aquél carga eléctrica positiva, la seda se electrifica negativamente.

Buscando una explicación que justificara este hecho, formuló la teoría de que estos fenómenos se producen debido a la existencia de un "fluido eléctrico" que se transfiere de un cuerpo a otro. Un cuerpo no electrizado tendría una "cantidad normal" de fluido. El frotamiento sería la causa de la transferencia y el cuerpo que recibiera más fluido quedaría electrizado positivamente mientras que el que lo perdiera quedaría electrizado negativamente. Así, conforme a estas ideas, no habría creación ni destrucción de carga eléctrica, sino únicamente una transferencia de electricidad de un cuerpo hacia otro.

En la actualidad se sabe que la teoría estaba parcialmente acertada. El proceso de electrización consiste en transferencia de carga eléctrica, pero no debido al fluido imaginado por Franklin, sino por el paso de electrones de un cuerpo hacia otro.

La teoría atómica afirma que toda materia está constituida, básicamente, por partículas: protones, electrones y neutrones. Los primeros poseen carga positiva (el tipo de carga con que se electrifica el vidrio), los segundos, carga negativa (el tipo de carga con que se electrifica la ebonita) y los neutrones carecen de carga eléctrica.

Un cuerpo no electrizado posee el mismo número de electrones que de protones. Cuando se frota dos cuerpos hay una transferencia de electrones de uno hacia otro y el cuerpo que presenta exceso de electrones queda cargado negativamente, mientras que el que los perdió presenta un exceso de protones provocando la existencia de eléctrica positiva.

Obsérvese que los electrones y protones no poseen en su seno nada positivo ni negativo, esto sólo es una denominación que se aplica a una propiedad intrínseca de la materia que se manifiesta mediante repulsiones y atracciones.

Propiedades de la carga eléctrica

- En un sistema eléctricamente aislado las cargas positivas y negativas pueden variar con el tiempo, pero su carga neta (carga positiva más carga negativa) es constante, es decir *la carga de un sistema aislado se conserva*.

En concordancia con los resultados experimentales, el principio de conservación de la carga establece que no hay destrucción ni creación de carga eléctrica, y afirma que en todo proceso eléctrico la carga total se conserva, tal como pensó Franklin.

Hemos visto que cuando se frota una barra de vidrio con seda, aparece en la barra una carga positiva. Las medidas muestran que aparece en la seda una carga negativa de igual magnitud. Esto hace



pensar que el frotamiento no crea la carga sino que simplemente la transporta de un objeto al otro, alterando la neutralidad eléctrica de ambos. Así, en un proceso de electrización, el número total de protones y electrones no se altera y sólo hay una separación de las cargas eléctricas. Por tanto, no hay destrucción ni creación de carga eléctrica, es decir, la carga total se conserva, tal como pensó Franklin.

Pueden aparecer cargas eléctricas donde antes no había, pero siempre lo harán de modo que la carga total del sistema permanezca constante. Además esta conservación es local, ocurre en cualquier región del espacio por pequeña que sea.

- En la naturaleza existe una carga mínima de electricidad¹ que es la carga negativa del electrón o positiva del protón ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C); esto implica que cualquier cuerpo sólo puede tener como carga múltiplos enteros de la carga del electrón o del protón, pero no fracciones. Esto se resume diciendo que *la carga está cuantizada*.
- La carga eléctrica es un *invariante relativista*, es independiente del sistema de referencia de la velocidad de éste.

La unidad de carga eléctrica en el S.I. es el culombio (C). Se define como la carga eléctrica que poseen dos cargas puntuales que en el vacío y a la distancia de un metro de atraen o se repelen con una fuerza de $9 \cdot 10^9$ N.

El culombio es una unidad muy grande. Se suele trabajar con sus submúltiplos: mili, micro, nano, pico...La unidad de carga en el sistema CGS es la unidad electrostática de carga (UEE), siendo $1 \text{ C} = 3 \cdot 10^9 \text{ UEE}$.

¹ Los **quarks** son fermiones de espín 1/2 que forman junto a los leptones la materia visible, incluidos nosotros mismos. Hay seis tipos o "sabores" distintos de quarks que los físicos han denominado de la siguiente manera: "up" (*arriba*), "down" (*abajo*), "charm" (*encanto*), "strange" (*extraño*), "top" (*cima*) y "bottom" (*fondo*), además de los correspondientes antiquarks. Los quarks no se encuentran libres en la naturaleza sino formando hadrones, éstos se dividen en dos tipos: mesones : formados por un quark y un antiquark (piones, kaones, ...) bariones : formados por tres quarks (protones, neutrones, ...) Además de una carga eléctrica fraccionaria de $-1/3$ o $+2/3$, los quarks tienen otra carga de *color*, que no tiene nada que ver con el color real de estas partículas, y que mantiene unidos a los quarks mediante la interacción fuerte, además de ser la responsable de la formación de estos hadrones. Esta interacción está descrita por la cromodinámica cuántica (QCD). Existen tres tipos de carga de color: *roja*, *azul* y *verde*. Los antiquarks presentan además cargas opuestas, *antirroja*, *antiazul* y *antiverde*. Junto a los leptones, los **quarks** forman prácticamente toda la materia de la que estamos rodeados, en concreto por los dos primeros quarks, ya que forman los protones y neutrones que a su vez forman los núcleos atómicos. El término quark, que en realidad no quiere decir nada, fue puesto por Murray Gell-Mann, trabajando entonces en el Instituto Tecnológico de California, sacado de una novela de James Joyce, *Finegan's wake*, más específicamente del verso *Three Quarks for Mr. Mark*



Interacción electrostática. Ley de Coulomb

Ley de Coulomb

La fuerza de interacción electrostática entre dos cargas es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\vec{F} = k \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_r$$

$(\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r}$ es el vector unitario en la dirección de r)

La interacción electrostática entre dos cargas en reposo se rige por la **ley de Coulomb**: Esta fuerza será atractiva o repulsiva según tengan las cargas distinto o igual signo, respectivamente.

La constante k representa físicamente la fuerza con que se repelen dos cargas de 1 C cada una situadas a 1 m de distancia. La constante k es función del medio en el que se encuentren las cargas, y se calcula a través de la expresión

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

siendo ϵ la constante dieléctrica del medio.

$$\text{En el vacío, } k_0 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \text{ y } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} .$$

Se suele escribir $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$, donde ϵ' es la permitividad relativa al vacío y ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío.

Sustancia	ϵ'
Aire	1,00059
Ebonita	3
Vidrio	6,9
Agua	81

Ej. La ley de Coulomb en el vidrio adoptaría la expresión: (trabajamos con módulos):

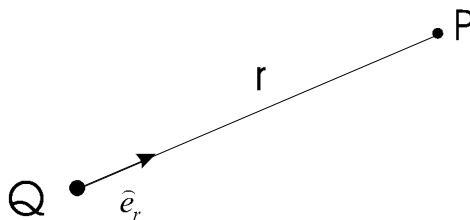
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon'} \frac{Qq}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{\epsilon'} \frac{Qq}{r^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{6,9} \frac{Qq}{r^2}$$



Campo electrostático

La ley de Coulomb indica que en el espacio que rodea a una carga Q se ejerce una cierta influencia que altera, perturba, sus propiedades de modo que, cuando en cualquier otro punto se sitúa otra carga q , pequeña frente a Q , aparecerá sobre ella una fuerza de interacción. La carga testigo o carga de prueba, que es el nombre que recibe la pequeña carga q , permite poner experimentalmente en evidencia la existencia de una cierta propiedad del espacio, en este caso de una fuerza electrostática que define la existencia de un campo vectorial, el llamado *campo electrostático* o *campo eléctrico*.

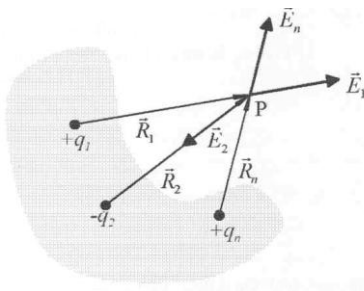
Llamamos *intensidad de campo electrostático* o simplemente *campo electrostático* \vec{E} creado por una carga puntual Q en un punto P del espacio a la fuerza electrostática que dicha carga Q ejercería sobre la unidad de *carga positiva* colocada en el punto P , es decir,



$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r = k \frac{Q}{r^3} \vec{r}$$

La unidad de intensidad de campo eléctrico en el S.I. es el N/C.

Si tenemos una distribución de cargas puntuales, la intensidad de campo electrostático en un punto P se calcula mediante el *principio de superposición*:



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = k \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^2} \vec{u}_{r_i}$$

Si la distribución de carga es continua, la intensidad de campo eléctrico será:

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \vec{u}_r$$

integral que suele ponerse en función de la densidad de carga lineal, superficial o volúmica, según corresponda:

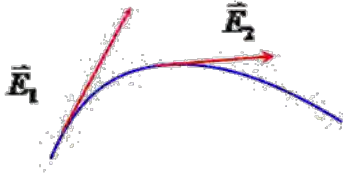
$$\lambda = \frac{dq}{dl}, \sigma = \frac{dq}{dS}, \rho = \frac{dq}{dV} \text{ Para distribuciones uniformes } \lambda = \frac{Q}{l}, \sigma = \frac{Q}{S}, \rho = \frac{Q}{V}$$

Las unidades de las densidades son C/m; C/m²; C/m³ respectivamente.



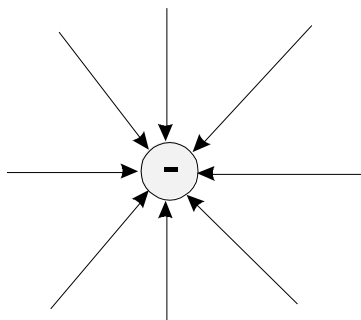
Campo eléctrico

Para representar un campo de fuerzas se utilizan las **líneas de campo**, que son líneas que indican la dirección del campo en cada punto y representan la dirección que seguirían partículas características que se abandonaran en reposo en el espacio.

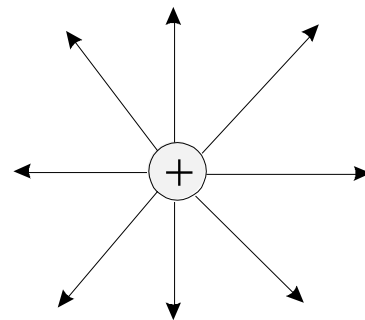


- El vector campo es en todo punto del campo tangente a las líneas de campo
- Dos líneas de campo no pueden cortarse ya que en ese caso en el punto de intersección existirían dos valores distintos para el vector campo.

Las líneas de campo electrostático de una carga puntual pueden ser de dos tipos:



Sumideros



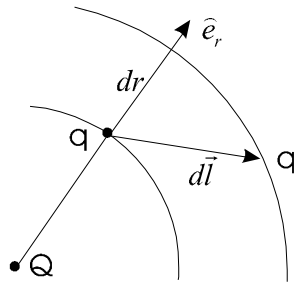
Manantiales

En la página web dispones de un java que te permite ver las líneas de campo para cualquier distribución discreta de cargas. (<http://www.maristasleon.com/fisica/EField.html>)



Energía potencial electrostática

El trabajo realizado para desplazar una carga q entre dos puntos A y B situados en el interior de un campo eléctrico creado por la carga Q es:



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int_A^B k \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_r \cdot d\vec{l} = \int_A^B k \frac{Qq}{r^2} dr =$$

$$= \left[-k \frac{Qq}{r} \right]_A^B = -kQq \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Entonces el campo electrostático es un campo de fuerzas conservativo ya que el trabajo realizado para desplazar una carga entre dos puntos cualesquiera del espacio es independiente del camino seguido para conectar los dos puntos; el trabajo sólo dependerá de los puntos inicial y final, y será igual a la diferencia de una función escalar llamada energía potencial electrostática:

$$W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p \text{ . Igualando:}$$

$$\Delta E_p = E_p(B) - E_p(A) = kQq \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

$$E_p(A) = E_p(B) - kQq \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Si tomamos como posición de referencia ($E_p=0$) donde el campo se anula (cuando $r \rightarrow \infty$), entonces

$$E_p(A) = \frac{kQq}{r_A}$$

expresión que proporciona la energía potencial de la carga q en el campo eléctrico creado por la carga Q (o viceversa) siendo r_A la distancia entre las cargas.

Si tenemos un sistema de partículas, la energía potencial del sistema se calcula como la suma de las energías potenciales de las parejas de cargas. Matemáticamente se expresa,

$$E_p = k \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

Puede definirse la energía potencial del sistema como el trabajo realizado por las fuerzas electrostáticas en la creación del sistema.

Si al calcular el trabajo para trasladar una carga entre dos puntos del campo se obtiene:

- $W = -\Delta E_p < 0$ (trabajo negativo), se ha hecho una fuerza en contra del campo para trasladar la carga,
- $W = -\Delta E_p > 0$ (trabajo positivo), la carga se ha desplazado por la acción de las fuerzas del campo.



Potencial eléctrico

El potencial electrostático creado por la carga Q en un punto P del espacio es la energía potencial que tendría la unidad positiva de carga en el campo electrostático generado por Q en el punto P . Coincide con el trabajo necesario para desplazar la unidad de carga positiva desde el punto P al infinito.

Si hacemos la identificación $V = \frac{E_p}{q}$, nos queda: $V = k \frac{Q}{r}$ siendo V el *potencial electrostático* generado por la carga Q en el punto P .

La unidad del potencial electrostático en el S.I. es el *voltio* ($1 V = 1 J/C$).

El potencial electrostático constituye una descripción escalar de la influencia que toda carga ejerce sobre el espacio que le rodea.

Podemos calcular el *trabajo* realizado al trasladar una carga q en el seno del campo electrostático generado por una carga Q mediante el potencial electrostático:

$$W = -\Delta E_p = -\Delta(qV) \Rightarrow W = q(V_A - V_B)$$

siendo A y B los puntos donde se inicia y finaliza respectivamente el desplazamiento de la carga.

- Se define *electrón-voltio* (eV) como la energía necesaria para desplazar un electrón entre dos puntos cuya diferencia de potencial es $1V$. equivale a $1,6 \cdot 10^{-19} J$

Si en lugar de una carga tenemos una distribución de cargas puntuales, el potencial electrostático en un punto P del espacio es la suma de los potenciales electrostáticos de cada una de las cargas en el punto P (*principio de aditividad de potenciales*):

$$V = V_1 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i = k \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

Relación entre vector campo y potencial.

Sabemos que el trabajo realizado para realizar un desplazamiento infinitesimal de una carga en el interior de un campo eléctrico coincide con la disminución de la energía potencial (variación negativa), es decir $W = -dE_p = \vec{F} \cdot d\vec{r}$. Dividiendo la expresión anterior por la carga nos queda

$$\frac{-dE_p}{q} = \frac{\vec{F}}{q} \cdot d\vec{r} \Rightarrow -dV = \vec{E} \cdot d\vec{r} \Rightarrow \vec{E} = -\frac{dV}{d\vec{r}} \text{ que se expresa generalmente :}$$

$\vec{E} = -\vec{\nabla}V = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k}\right)$ (El vector campo es igual al gradiente del potencial cambiado de signo).

Cuando el campo es unidimensional : $E = -\frac{dV}{dx}$



Líneas de campo y superficies equipotenciales.

Las superficies equipotenciales son superficies donde el potencial es constante;

- **Son superficies de trabajo nulo**, es decir, **el trabajo realizado para trasladar una carga por una superficie equipotencial es cero**, ya que en la fórmula $W = q(V_A - V_B)$ si $V_A = V_B$ necesariamente $W = 0$.
- **El vector campo (y por lo tanto las líneas de campo) es perpendicular a las superficies equipotenciales.**

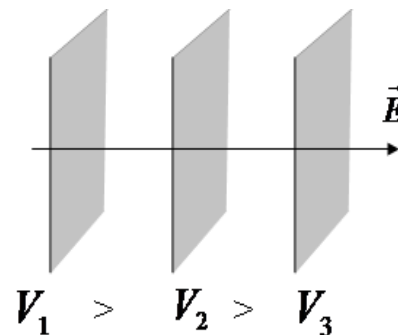
Si el trabajo al desplazar una carga sobre una superficie equipotencial es nulo $W_{A \rightarrow B} = \vec{F} \cdot \vec{r} = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{r} = 0 \Rightarrow \vec{E} \cdot \vec{r} = 0 \Rightarrow$ el vector campo y el vector desplazamiento sobre una sup. equipotencial son perpendiculares, es decir el campo es perpendicular a la superficie equipotencial

- **Las superficies equipotenciales no pueden cortarse.**

Ya que en los puntos de intersección existirían dos vectores campo, uno perpendicular a cada superficie lo cual es absurdo.

- **El vector campo tiene el sentido de los potenciales decrecientes**

Es consecuencia de la relación $E = -\frac{dV}{dx}$

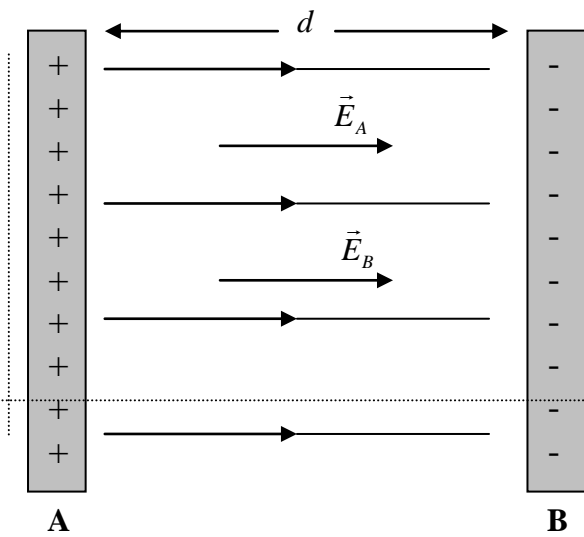




Condensadores. Campo eléctrico en el interior de un condensador.

Un condensador está formado por dos conductores cualesquiera separados por un dieléctrico. Los conductores tienen igual carga pero de signo contrario, de forma que la carga neta (suma de cargas positivas y negativas) es nula.

Consideremos un condensador formado por dos placas conductoras paralelas y separadas por una distancia pequeña frente a las dimensiones lineales de las placas. El campo eléctrico en el interior del condensador se calcula como la suma del campo eléctrico generado por la placa con carga positiva y el campo eléctrico generado por la placa con carga negativa. El campo eléctrico es constante en el interior del condensador,



Puesto que el campo eléctrico en el interior del condensador sólo tiene componente según el eje X y teniendo en cuenta la relación entre el campo eléctrico y el potencial eléctrico se tiene:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial V}{\partial z}\vec{k}\right)$$

de donde se observa que el potencial eléctrico en el interior del condensador no es función ni de y ni de z, por lo que podemos omitir vectores y escribir:

bir:

$$E = -\frac{dV}{dx} \Rightarrow E dx = -dV \Rightarrow \int E dx = \int -dV$$

El campo eléctrico es constante en el interior del condensador, por lo que puede sacarse fuera del símbolo integral, obteniéndose:

$$E \Delta x = -\Delta V$$

Si consideramos el desplazamiento entre la placa A y B, queda

$$E.d = -(V_B - V_A) \Rightarrow E = \frac{V_A - V_B}{d}$$