

CLASE 10 · CAPÍTULO 4 · POTENCIAL ELÉCTRICO · 2:52 MIN

DE LA FUERZA A LA ENERGÍA

La fuerza eléctrica es conservativa, así que tiene una energía potencial: para dos cargas vale $k_e q_1 q_2 / r$ con cero en el infinito, y para un sistema se suma sobre todos los pares.

VER LA CLASE

BNSOLUTIONS.CL/LECTURES

01 IDEAS CLAVE

Fuerza conservativa y energía potencial

Una fuerza es conservativa si el trabajo que hace entre dos puntos depende solo de esos puntos y no del camino. Para ella existe una energía potencial U con $W_{a\to b} = -\Delta U = U_a - U_b$. Si la fuerza hace trabajo positivo, U baja; si hay que mover el cuerpo en su contra, U sube.

El parecido con la gravedad

La fuerza $q\vec{E}$ tiene la misma estructura que el peso: ambas son fuerzas centrales que decaen como $1/r^2$, y toda fuerza central es conservativa. Subir una masa una altura d guarda mgd; mover una carga positiva una distancia d contra un campo uniforme guarda qEd. La comparación es exacta solo con campo uniforme: en general $\vec{E}$ cambia de un punto a otro.

La definición general

Para un campo y un camino cualesquiera, $U_b - U_a = -q\int_a^b \vec{E}\cdot d\vec{s}$. Donde el campo empuja a favor del desplazamiento, $\vec{E}\cdot d\vec{s} > 0$ y U baja. Como $\vec{E}$ es conservativo, la integral no depende del camino y se puede evaluar por el más cómodo.

Dos cargas puntuales y su signo

Si q_1 está fija y q_2 va de r_a a r_b, solo importan esas dos distancias. Tomando $U = 0$ con las cargas infinitamente separadas, $U(r) = k_e q_1 q_2 / r$, con el signo de $q_1 q_2$ incluido. Con cargas del mismo signo $U > 0$ y separarlas libera energía; con signos opuestos $U < 0$ y separarlas cuesta energía.

Un sistema de cargas

Para armar un sistema se traen las cargas una a una desde el infinito, y cada una interactúa con las que ya están. La energía total es la suma sobre todos los pares, cada par contado una vez: con tres cargas, tres términos. Esa energía es lo que cuesta armar el sistema; el trabajo de la fuerza eléctrica en el proceso es $-U_{\text{total}}$. La clase siguiente divide U por la carga de prueba y obtiene el potencial.

02 FÓRMULAS

$$W_{a\to b} = -\Delta U = U_a - U_b$$

Vale para cualquier fuerza conservativa; $W_{a\to b}$ es el trabajo que hace esa fuerza.

$$U = qEd$$

Carga q desplazada una distancia d en sentido contrario a un campo uniforme $\vec{E}$. Es el análogo de $U = mgd$.

$$U_b - U_a = -\int_a^b \vec{F}\cdot d\vec{s} = -q\int_a^b \vec{E}\cdot d\vec{s}$$

Definición general; la integral no depende del camino entre a y b.

$$U_b - U_a = k_e q_1 q_2\left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a}\right)$$

Dos cargas puntuales cuya separación pasa de r_a a r_b, por cualquier camino.

$$U(r) = \frac{k_e q_1 q_2}{r}$$

Con la referencia $U = 0$ a separación infinita. Lleva el signo de $q_1 q_2$.

$$U_{\text{total}} = \sum_{i<j} \frac{k_e q_i q_j}{r_{ij}}$$

Suma sobre pares distintos; con tres cargas, $U_{12} + U_{13} + U_{23}$.

03 EJEMPLO RESUELTO

RESUELTO PASO A PASO

Tres cargas de $+2{,}0\ \mu$C ocupan los vértices de un triángulo equilátero de lado $a = 10$ cm. ¿Cuánta energía cuesta armar el sistema trayendo las cargas desde el infinito? Si después se sueltan y los lados llegan a 16 cm, ¿cuánta energía cinética tienen en total?

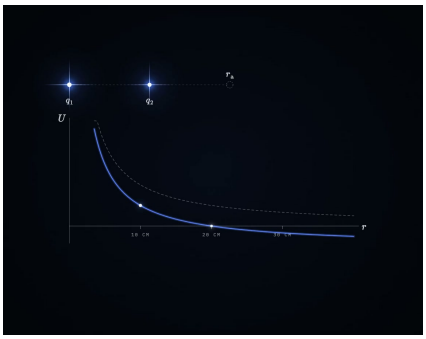
1. La primera carga llega sin costo: todavía no hay nada con qué interactuar.
2. La segunda interactúa con la primera: $U_{12} = k_e q^2/a = (8{,}99\times10^{9})(2{,}0\times10^{-6})^2/0{,}10 = 0{,}360$ J.
3. La tercera interactúa con las dos anteriores, y ambas están a la distancia a: agrega $U_{13} + U_{23} = 0{,}719$ J.
4. En total, $U_{\text{total}} = 3k_e q^2/a = 1{,}08$ J, positiva porque las tres cargas se repelen.
5. Al soltarlas, la energía se conserva. Con lados de 16 cm, $U = 3k_e q^2/(0{,}16\text{ m}) = 0{,}674$ J, así que $K = 1{,}08\text{ J} - 0{,}674\text{ J} = 0{,}405$ J.

RESULTADO Armar el triángulo cuesta $U_{\text{total}} = 1{,}08$ J; con lados de 16 cm, las cargas suman $K = 0{,}405$ J de energía cinética.

04 EN EL VIDEO



MINUTO 0:30



MINUTO 1:49



MINUTO 2:28

05 ¡OJO!

- En $U = k_e q_1 q_2 / r$ las cargas van con su signo. Poner valores absolutos borra justamente la información de si las cargas se atraen o se repelen.
- $W_{a\to b} = -\Delta U$ es el trabajo de la fuerza eléctrica. El trabajo de un agente que mueve la carga lentamente, sin cambiar su energía cinética, es $+\Delta U$.
- $U = qEd$ solo vale con campo uniforme y desplazamiento rectilíneo. Con un campo que cambia de punto a punto hay que integrar.
- En la suma sobre pares cada pareja se cuenta una vez ($i < j$). Sumar $i \neq j$ sin dividir por dos duplica la energía.

06 PARA PENSAR

? Si un electrón se mueve en el mismo sentido que el campo eléctrico, ¿su energía potencial sube o baja? ¿Y la de un protón?

? ¿Por qué la energía de un par se puede dejar en cero a separación infinita, sin que eso cambie ninguna predicción física?

? Un sistema de cargas tiene energía potencial total negativa. ¿Qué quiere decir eso sobre el trabajo necesario para desarmarlo?

07 EJERCICIOS

DIFICULTAD ●○○ DIRECTA ●●○ COMBINA IDEAS ●●● DESAFÍO · SOLUCIONES AL FINAL

01 ●○○

Una carga $q = -3{,}0\ \mu\text{C}$ se desplaza 25 cm en el mismo sentido de un campo uniforme $E = 4{,}0 \times 10^4$ N/C. Calcule el trabajo del campo y el cambio de energía potencial.

02 ●○○

En el modelo de Bohr, el electrón del hidrógeno está a $r = 5{,}29 \times 10^{-11}$ m del protón. Calcule la energía potencial eléctrica del par, con $U = 0$ a separación infinita.

03 ●●○

Una carga $q_1 = +3{,}0\ \mu\text{C}$ está fija. Una carga $q_2 = -2{,}0\ \mu\text{C}$ se lleva, por un camino cualquiera, desde 30 cm hasta 10 cm de ella. Calcule el cambio de energía potencial, el trabajo de la fuerza eléctrica y el trabajo de un agente que la mueve lentamente.

04 ●●●

Cuatro cargas ocupan los vértices de un cuadrado de lado $a = 10$ cm, alternando $+2{,}0\ \mu\text{C}$ y $-2{,}0\ \mu\text{C}$ (las del mismo signo quedan en diagonal). Calcule la energía potencial del sistema y el trabajo que debe hacer un agente para llevar una de las cargas positivas al infinito, lentamente.

08 SOLUCIONES

EJERCICIO 01

La fuerza es $q\vec{E}$ y apunta contra el desplazamiento porque $q < 0$: $W = qEd = (-3{,}0 \times 10^{-6})(4{,}0 \times 10^{4})(0{,}25)$. Luego $\Delta U = -W$.

$W = -0{,}030$ J y $\Delta U = +0{,}030$ J: **la energía potencial sube.**

EJERCICIO 02

$U = k_e q_1 q_2 / r = (8{,}99{\times}10^{9})(1{,}602{\times}10^{-19})(-1{,}602{\times}10^{-19})/(5{,}29{\times}10^{-11})$.

$U = -4{,}36 \times 10^{-18}$ J **(negativa: el par está ligado).**

EJERCICIO 03

$\Delta U = k_e q_1 q_2 (1/r_b - 1/r_a) = (8{,}99 \times 10^{9})(3{,}0 \times 10^{-6})(-2{,}0 \times 10^{-6})(1/0{,}10 - 1/0{,}30)$. El campo hace $W = -\Delta U$ y el agente, $+\Delta U$. El camino no importa.

$\Delta U = -0{,}360$ J; **trabajo eléctrico** $+0{,}360$ J; **trabajo del agente** $-0{,}360$ J **(tiene que frenarla).**

EJERCICIO 04

Hay seis pares: cuatro lados con cargas opuestas a distancia a y dos diagonales con cargas iguales a distancia $a\sqrt{2}$. Con $q = 2{,}0\ \mu$C, $U = k_e q^2(-4/a + 2/(a\sqrt{2}))$. La carga que se retira participa en dos lados y una diagonal: $U_1 = k_e q^2(-2/a + 1/(a\sqrt{2}))$. Al llevarla al infinito ese término desaparece, así que el agente hace $W = -U_1$.

$U = -0{,}930$ J; **el agente debe hacer** $+0{,}465$ J.

09 PARA SEGUIR

LECTURAS

Física universitaria vol. 2 · 7.1 Energía potencial eléctrica

Trabajo de la fuerza eléctrica, fuerza conservativa y energía de un sistema de cargas.

OPENSTAX · CC BY 4.0 · ES

Feynman Lectures Vol. II · Cap. 8 Electrostatic Energy

Sección 8-1: energía de un sistema de cargas como suma por pares y la esfera uniforme.

RICHARD P. FEYNMAN (CALTECH) · LECTURA LIBRE EN LÍNEA (© CALTECH) · EN

CURSOS ABIERTOS

MIT 8.02 (primavera 2007) · Cap. 3 Electric Potential (apuntes PDF)

Secciones 3.1 y 3.3.1: potencial, energía potencial y energía de un sistema de cargas.

MIT OPENCOURSEWARE (P. DOURMASHKIN, J. BELCHER ET AL.) · CC BY-NC-SA 4.0 · EN

Basada en: Apuntes de Electricidad y Magnetismo (J. Patiño, CFSA3440), Clase 4 «Potencial eléctrico», secciones 1 «Energía potencial: lo que ya sabemos de mecánica» y 2 «Energía potencial eléctrica» (2.1 y 2.2, con las Figuras 4.1 y 4.2, las ecuaciones 4.1 y 4.2 y el ejemplo del triángulo), páginas 74 a 77 del PDF. Ficha de B&N Lectures, proyecto creado y dirigido por Nicolás Moreno; el texto, los ejercicios y las cifras son propios y se comprobaron con código. Fotogramas del video de la clase. © 2026 B&N Solutions · bnsolutions.cl/lectures