

Tema 2

CAMPO ELÉCTRICO

ÍNDICE

1 Carga eléctrica y ley de Coulomb	2
2 Campo eléctrico y superposición	2
3 Potencial eléctrico y energía	3
4 Movimiento y equilibrio de cargas	4
Péndulo eléctrico	4
5 Conductores en equilibrio electrostático	5
6 Flujo eléctrico y teorema de Gauss	5
7 Aplicaciones del teorema de Gauss	6
8 Condensadores	7
9 Ejemplos resueltos	8
10 Errores frecuentes y método de resolución	8

En este tema aprenderás a calcular la fuerza que actúa sobre una carga y a describir el campo mediante su intensidad y su potencial. La energía permite estudiar el movimiento; Gauss y los condensadores completan las aplicaciones básicas.

Unidades y constantes de uso habitual

Magnitud o dato	Valor o unidad
Carga eléctrica	$C \cdot 1 \mu C = 10^{-6} C \cdot 1 nC = 10^{-9} C$
Campo eléctrico y potencial	$N/C = V/m$ para el campo $\cdot V = J/C$ para el potencial
Constante de Coulomb en el vacío	$k = 8,99 \cdot 10^9 N \cdot m^2/C^2 \approx 9 \cdot 10^9 N \cdot m^2/C^2$
Permitividad del vacío y carga elemental	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} C^2/(N \cdot m^2) \cdot e = 1,60 \cdot 10^{-19} C$

1. Carga eléctrica y ley de Coulomb

La carga eléctrica es una propiedad de la materia. Puede ser positiva o negativa: cargas del mismo signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen. La carga total de un sistema aislado se conserva. Un cuerpo se electriza al ganar o perder electrones.

La carga está cuantizada: es un múltiplo entero de la carga elemental. El protón tiene carga $+e$ y el electrón, $-e$. La unidad del Sistema Internacional es el culombio (C).

Ley de Coulomb. Dos cargas puntuales en reposo, separadas una distancia r , ejercen fuerzas iguales y opuestas sobre la recta que las une. El módulo de cada fuerza es:

$$F = \frac{k |q_1 q_2|}{r^2} \quad ; \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

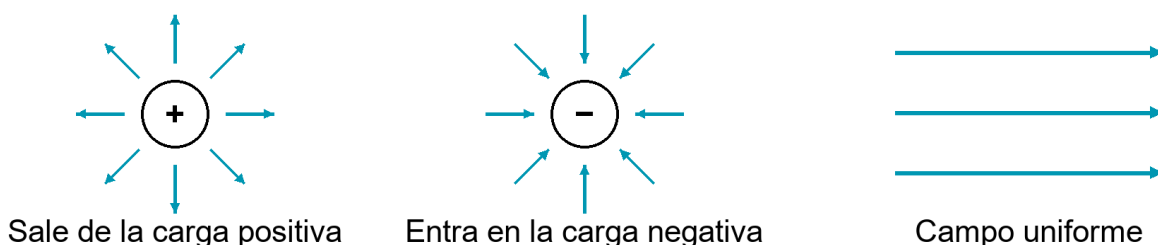
En un medio dieléctrico homogéneo, la permitividad del medio sustituye a la del vacío. Para cuerpos pequeños, el modelo de carga puntual es válido si su tamaño es mucho menor que la distancia que los separa.

2. Campo eléctrico y superposición

El campo eléctrico indica la fuerza por unidad de carga positiva de prueba. Lo crean las cargas fuente; existe aunque no coloquemos ninguna carga de prueba en ese punto.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad ; \quad \vec{F} = q\vec{E} \quad ; \quad \vec{E} = \frac{kQ}{r^2} \vec{u}_r$$

En la última expresión, Q es la carga fuente y el vector unitario radial apunta desde ella al punto de cálculo. El campo sale de las cargas positivas y entra en las negativas. Sobre una carga negativa, la fuerza tiene sentido opuesto al campo.



Superposición. Si hay varias cargas, se suman sus campos como vectores. Primero calcula las componentes de cada contribución y después súmalas.

$$\vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad ; \quad E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

Las líneas de campo son tangentes al vector campo, no se cruzan y son más densas donde el campo es mayor. En un campo uniforme, el vector campo es igual en todos los puntos.

Clave PAU Dibuja los sentidos antes de operar. La suma de los módulos solo sirve cuando los campos tienen la misma dirección y el mismo sentido.

3. Potencial eléctrico y energía

Potencial eléctrico

El potencial es la energía potencial por unidad de carga. Es escalar y se suma con su signo. Para una carga puntual Q , tomando el potencial nulo en el infinito:

$$V = \frac{E_p}{q} \quad ; \quad V = \frac{kQ}{r} \quad ; \quad V_T = V_1 + V_2 + \dots$$

El potencial de una carga puntual tiene el signo de Q . Con varias cargas, las contribuciones positivas y negativas pueden compensarse.

Energía potencial y trabajo

La energía potencial de una carga q situada en un potencial externo V es $E_p = qV$. Para dos cargas puntuales separadas una distancia r :

$$E_p = \frac{kq_1q_2}{r}$$

Con energía nula a separación infinita, la energía potencial es positiva para cargas del mismo signo y negativa para signos opuestos. En un sistema de varias cargas se suma la energía de cada pareja una sola vez.

La fuerza electrostática es conservativa: su trabajo entre A y B no depende del camino. Ese trabajo es igual a la disminución de energía potencial:

$$W_{A \rightarrow B} = -\Delta E_p = q(V_A - V_B) = -q\Delta V \quad ; \quad \Delta V = V_B - V_A$$

Un trabajo eléctrico positivo disminuye la energía potencial. Si una fuerza externa mueve la carga sin cambiar su energía cinética y ninguna otra fuerza realiza trabajo, el trabajo externo es el opuesto al del campo.

Relación entre campo y potencial

El campo apunta hacia donde el potencial disminuye más rápidamente. En un campo uniforme dirigido según $+x$:

$$V_B - V_A = -E(x_B - x_A) \quad ; \quad E = \frac{|\Delta V|}{d}$$

La segunda igualdad se usa si d se mide en la dirección del campo. En un campo no uniforme, no puede aplicarse con un único valor del campo.

Las superficies equipotenciales tienen el mismo potencial en todos sus puntos. El campo es perpendicular a ellas y mover una carga sobre una de ellas requiere trabajo eléctrico nulo.

Campo eléctrico	Potencial eléctrico
Es vectorial y se mide en N/C.	Es escalar y se mide en V.
Se suma por componentes.	Se suma algebraicamente con los signos.

Clave PAU Campo nulo y potencial nulo son condiciones distintas. En el punto medio de dos cargas iguales, el campo es nulo y el potencial no lo es.

4. Movimiento y equilibrio de cargas

Movimiento en un campo eléctrico uniforme

Si solo actúa la fuerza eléctrica, la segunda ley de Newton da una aceleración constante en un campo uniforme:

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$$

Una carga positiva acelera en el sentido del campo; una negativa, en sentido contrario. Si entra paralela al campo, el movimiento es rectilíneo acelerado; si entra perpendicularmente, describe una parábola.

Para un campo dirigido según +y, despreciando el peso:

$$x = x_0 + v_{0x}t \quad ; \quad y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$$

Conservación de la energía

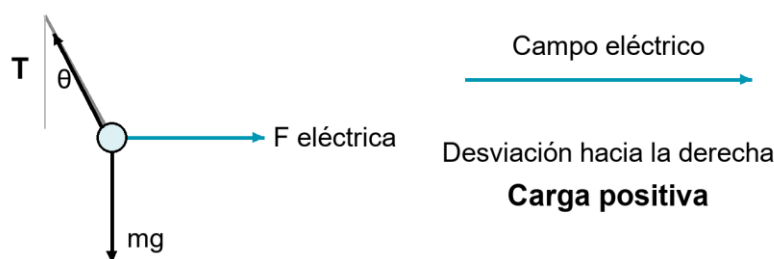
Si solo la fuerza eléctrica realiza trabajo, se conserva la energía mecánica:

$$\frac{1}{2} m v_A^2 + qV_A = \frac{1}{2} m v_B^2 + qV_B$$

Al soltarlas desde el reposo, las cargas positivas comienzan a moverse hacia potenciales menores y las negativas hacia mayores. Ambas pierden energía potencial. Si el peso es relevante, hay que incluir también la energía potencial gravitatoria.

Péndulo eléctrico

Un péndulo eléctrico es una esfera cargada suspendida de un hilo ligero e inextensible. En un campo eléctrico horizontal uniforme, se inclina hasta que el peso, la tensión y la fuerza eléctrica se equilibran.



Con θ medido desde la vertical, el equilibrio en cada eje da:

$$T \cos \theta = mg \quad ; \quad T \sin \theta = |q|E$$

Dividiendo las dos ecuaciones obtenemos la relación entre el ángulo y la fuerza eléctrica:

$$\tan \theta = \frac{|q|E}{mg} \quad ; \quad |q| = \frac{mg \tan \theta}{E} \quad ; \quad T = \frac{mg}{\cos \theta}$$

Clave PAU Si la esfera se desvía en el sentido del campo, $q > 0$; si se desvía en sentido contrario, $q < 0$. El ángulo se mide desde la vertical.

Ejemplo. Con $m = 2,0 \text{ g}$, $E = 2,0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$ y $\theta = 30^\circ$, se obtiene $|q| = 5,7 \text{ } \mu\text{C}$ y $T = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ N}$, usando $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

5. Conductores en equilibrio electrostático

En un conductor hay cargas que pueden moverse. Al alcanzar el equilibrio electrostático dejan de tener un movimiento neto debido al campo. Se cumplen estas propiedades:

- El campo eléctrico es nulo dentro del material conductor. Si no lo fuera, las cargas libres seguirían desplazándose.
- Todo el conductor tiene el mismo potencial. En la superficie, el campo exterior es perpendicular a ella.
- El exceso de carga se distribuye por la superficie. En zonas de mayor curvatura, como las puntas, puede concentrarse más carga.

Para una esfera conductora aislada de radio R y carga Q , con potencial nulo en el infinito:

$$V = \frac{kQ}{R} \quad (r \leq R) \quad ; \quad V = \frac{kQ}{r} \quad (r \geq R)$$

Dos esferas conductoras muy separadas, conectadas mediante un hilo fino, intercambian carga hasta igualar sus potenciales. Si no se pierde carga:

$$Q_{1f} + Q_{2f} = Q_{1i} + Q_{2i} \quad ; \quad \frac{Q_{1f}}{R_1} = \frac{Q_{2f}}{R_2}$$

La segunda relación supone que cada esfera puede tratarse como aislada frente a la influencia de la otra. Si sus radios son iguales, sus cargas finales son iguales; si son distintos, la esfera mayor queda con mayor módulo de carga.

Clave PAU Lo que se iguala al conectar conductores es el potencial. Las cargas solo se igualan en casos con la simetría adecuada, como dos esferas iguales.

6. Flujo eléctrico y teorema de Gauss

El flujo eléctrico mide cuánto campo atraviesa una superficie. Para un campo uniforme y una superficie plana de área S :

$$\Phi_E = \vec{E} \cdot \vec{S} = ES \cos \theta$$

El vector superficie es perpendicular a la superficie y su módulo es el área. El ángulo θ se mide entre el campo y esa normal: el flujo es máximo en valor absoluto cuando son paralelos y es cero cuando son perpendiculares. Su unidad es $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$.

El teorema de Gauss relaciona el flujo neto que atraviesa una superficie cerrada con la carga total encerrada:

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0}$$

En una superficie cerrada, la normal apunta hacia fuera. El flujo es positivo donde el campo sale y negativo donde entra. Las cargas exteriores pueden crear campo en la superficie, pero su contribución al flujo neto es nula.

Clave PAU Un flujo neto nulo significa carga neta encerrada nula. No significa necesariamente que el campo sea cero en todos los puntos de la superficie.

7. Aplicaciones del teorema de Gauss

Gauss siempre se cumple. Para obtener fácilmente el campo a partir del flujo, debe existir suficiente simetría. Elige una superficie imaginaria donde el campo tenga módulo constante y una dirección sencilla respecto a la normal.

Simetría esférica

Para una carga puntual o fuera de una distribución esféricamente simétrica, se usa una esfera gaussiana de radio r . El campo es radial y constante en módulo sobre ella:

$$|\Phi_E| = E 4\pi r^2 = \frac{|Q|}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{k|Q|}{r^2}$$

Distribución de radio R	Dentro $r < R$	Fuera $r > R$
Esfera conductora en equilibrio	$E = 0$	$E = \frac{k Q }{r^2}$
Esfera maciza aislante con carga volumétrica uniforme	$E = \frac{k Q r}{R^3}$	$E = \frac{k Q }{r^2}$

En la esfera aislante uniforme, el módulo de la carga encerrada aumenta como r^3 ; por eso el campo interior aumenta linealmente con r . En la conductora, el exceso de carga está en la superficie y el campo interior es nulo. En ambos casos, el campo exterior es el de una carga puntual situada en el centro.

Plano infinito con carga uniforme

Si σ es la carga por unidad de área, se usa una superficie cilíndrica que atraviese el plano. El flujo solo pasa por las dos bases, de área S cada una:

$$2ES = \frac{|\sigma|S}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0}$$

El campo es perpendicular al plano y no depende de la distancia. Entre dos planos paralelos con densidades $+\sigma$ y $-\sigma$, los campos se suman; fuera se anulan:

$$E_{\text{entre placas}} = \frac{|\sigma|}{\epsilon_0} ; \quad E_{\text{exterior}} = 0$$

Este resultado aproxima el campo de un condensador de placas grandes y próximas, lejos de los bordes. Justo fuera de un conductor en equilibrio, el campo normal tiene módulo $|\sigma|/\epsilon_0$; no se debe confundir con el de una sola lámina no conductora.

Hilo rectilíneo infinito

Si λ es la carga por unidad de longitud, se elige un cilindro coaxial de radio r y longitud L . Solo hay flujo por su superficie lateral:

$$E 2\pi r L = \frac{|\lambda|L}{\epsilon_0} \Rightarrow E = \frac{|\lambda|}{2\pi\epsilon_0 r}$$

Clave PAU Gauss proporciona el módulo en estos desarrollos. El sentido se deduce del signo de la carga: hacia fuera si es positiva y hacia ella si es negativa.

8. Condensadores

Un condensador tiene dos conductores separados por un aislante, con cargas $+Q$ y $-Q$. Su carga Q es el módulo de la carga de una placa; la carga neta del conjunto es cero.

Capacidad y condensador plano

La capacidad mide cuánta carga almacena por cada voltio de diferencia de potencial. Su unidad es el faradio (F). Para placas paralelas de área S , separadas una distancia d :

$$C = \frac{Q}{|\Delta V|} \quad ; \quad C = \frac{\epsilon S}{d} \quad ; \quad E = \frac{|\Delta V|}{d}$$

Estas expresiones para placas paralelas desprecian los bordes. La permitividad es ϵ_0 en el vacío y $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ si un dieléctrico llena el espacio; ϵ_r es la permitividad relativa.

La capacidad aumenta con el área y la permitividad, y disminuye al separar las placas. Depende de la geometría y del material, no de cuánto carguemos el mismo condensador ideal.

Energía almacenada

Cargar un condensador requiere trabajo. La energía queda almacenada en su campo eléctrico:

$$U = \frac{1}{2} Q |\Delta V| = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

Asociaciones de condensadores

Conexión	Qué comparten	Capacidad equivalente
Paralelo	La misma diferencia de potencial. Las cargas se suman.	$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots$
Serie	El mismo módulo de carga, si los nodos intermedios eran neutros. Las tensiones se suman.	$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

Qué permanece constante al modificarlo

Situación	Dato que se conserva	Si aumenta la capacidad C
Conectado a una batería ideal	La tensión. La batería intercambia carga.	Aumentan Q y U .
Aislado tras desconectarlo	La carga, si no hay fugas.	Disminuyen $ \Delta V $ y U .

Un dieléctrico que llene el espacio multiplica C por ϵ_r . Con batería, aumenta Q a tensión constante; aislado, Q se conserva y la tensión se divide entre ϵ_r .

Clave PAU Antes de calcular, decide si la batería sigue conectada. Usa la forma de la energía que contenga la magnitud que permanece constante.

9. Ejemplos resueltos

Dos cargas iguales y su punto medio

Dos cargas de $+2 \mu\text{C}$ están separadas 2 m en el vacío. Calcula el campo y el potencial en el punto medio. Cada carga está a 1 m del punto y tomamos $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$.

Los campos tienen el mismo módulo y sentidos opuestos, por lo que se anulan. Los potenciales tienen el mismo signo y se suman:

$$\vec{E}_T = \vec{0} \quad ; \quad V_T = 2 \cdot \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{1} = 3,6 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Si una carga cambia a $-2 \mu\text{C}$, el potencial en el punto medio es cero y el campo es $3,6 \cdot 10^4 \text{ N/C}$, dirigido de la carga positiva a la negativa.

Una carga acelerada por una diferencia de potencial

Un protón parte del reposo y pasa de un punto a 200 V a otro a 0 V. Su carga es $+1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y su masa, $1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Si solo actúa el campo eléctrico, ¿qué rapidez alcanza?

$$\Delta E_c = q(V_A - V_B) = 3,20 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta E_c}{m}} = 1,96 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

El protón gana energía cinética al moverse hacia un potencial menor. La raíz positiva da la rapidez; el campo y las condiciones iniciales determinan el sentido.

10. Errores frecuentes y método de resolución

Error frecuente	Cómo evitarlo
Sumar campos como si fueran escalares.	Dibuja cada vector y suma sus componentes.
Eliminar los signos de las cargas en V o E_p .	Conserva los signos en potencial y energía; usa valores absolutos para módulos.
Confundir campo nulo con potencial nulo.	Calcula ambas magnitudes por separado.
Usar el ángulo con el plano para el flujo.	Mide el ángulo respecto a la normal a la superficie.
Olvidar si el condensador está aislado o conectado.	Determina qué permanece constante: Q o ΔV .

Método de resolución. Dibuja y elige ejes; pasa los datos al SI; escribe la ley física; calcula con signos coherentes; indica unidades y comprueba el resultado.

En la PAU, justifica la respuesta y añade un esquema cuando ayude. Si se pide una deducción, muestra los pasos.

Material de consulta UCLM, Información de Física y modelo orientativo de examen, curso 2025/2026.