



Estos pretenden ser unos apuntes de resumen solamente de teoría, ver ejercicios en [www.fiquipedia.es](http://www.fiquipedia.es). Se trata el bloque de 2º Bachillerato LOMCE “Interacción electromagnética” que se implanta en curso 2016-2017, cubriendo contenidos, y a veces citando criterios de evaluación y estándares de aprendizaje evaluables. Parte de los contenidos del bloque “Interacción electromagnética” se tratan en apuntes aparte de campo magnético; uniendo esos apuntes se ve completo el bloque tal y como lo plantea LOMCE.

El campo eléctrico se ve en 1º Bachillerato y se asumen conocidos ciertos conceptos básicos, que se citan aquí de nuevo de manera breve. Como criterio personal en física de 2º trato antes el bloque de gravitación, en el que se tratan ideas que se reutilizan aquí: fuerzas conservativas, energía potencial, campo y potencial. El concepto de campo es esencial en este bloque, se apoya en lo visto de campo gravitatorio, se comentan las analogías entre ellos, se amplía con la idea de flujo, y sirve de apoyo para el campo magnético.

## 1. Conceptos básicos interacción electrostática. Naturaleza eléctrica de la materia

Carga eléctrica: positiva y negativa (nombres arbitrarios)

- Mismo signo se repelen, distinto signo se atraen
- La carga se conserva
- Carga cuantizada: múltiplo de carga elemental (electrón (-)/protón(+)), módulo  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 La determinación de la carga del electrón que confirmaba que estaba cuantizada se hizo en 1909 con el experimento de la gota de aceite por Millikan (Nobel en 1923), apoyándose en la determinación de la relación carga/masa del electrón realizada en 1897 por Thomson (Nobel 1906).
- Fenómenos electrización: se debe a pérdida o ganancia de electrones, alterar equilibrio neutro. Tipos: frotamiento, contacto (péndulo eléctrico, electroscopio) e inducción.

## 2. Ley de Coulomb

$$\vec{F} = K \frac{Qq}{r^2} \vec{u}_r \quad K \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}; \quad K = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad \begin{array}{l} \epsilon = \epsilon' \cdot \epsilon_0 \\ \epsilon' = \text{permitividad relativa del medio (a veces se indica } \epsilon_r) \\ \epsilon_0 = \text{permitividad eléctrica del vacío} \end{array}$$

Sentido de la fuerza depende de los signos de las dos cargas

Unidad de carga; Culombio (C): cantidad de carga eléctrica asociada a una intensidad de 1 Amperio (A)

Para una distribución de cargas puntuales la fuerza total es la suma vectorial de fuerzas que ejercen cada una por separado: **principio de superposición**.

Pasos a seguir para calcular la fuerza un caso general de sistema de cargas: tomar origen de coordenadas en el punto donde queremos calcular la fuerza total ejercida, hallar fuerzas y descomponerlas calculando la resultante. La simetría puede ayudar. Normalmente se asume que hay algunas cargas “con posición fija” y otras móviles: en la realidad todas se moverían.

>A veces se indica  $q_1$  y  $q_2$ ; aquí Q y q para separar simbólicamente Q “la que crea” y q “la afectada”

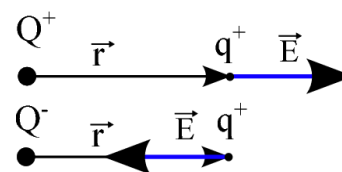
## 3. Campo eléctrico

Conceptos generales de campo de fuerzas y líneas de campo análogos a gravitación, salvo que aquí la dirección del campo no es siempre atractiva. Diagramas líneas de campo junto a superficies equipotenciales.

### 3.1 Intensidad de campo eléctrico

Un vector para cada punto del espacio, fuerza ejercida por carga de prueba positiva

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^+} = K \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{u}_r \quad \text{Unidades N/C ó V/m} \quad \vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r} \quad r \text{ con origen en la carga}$$



Sentido campo depende del signo de la carga que lo genera

Para un sistema de cargas puntuales se aplica igualmente el **principio de superposición** con campo.

### 3.2 Energía potencial y Potencial eléctrico

Conceptos generales de fuerza central, conservativas, energía potencial, energía mecánica y teoremas asociados (fuerzas vivas, conservación) ya vistos en gravitación.

Magnitudes asociadas a que campo eléctrico es conservativo.  $U = E_p \quad \Delta U_{AB} = U(B) - U(A) = -W_{A \rightarrow B}$

Se dan diferencias, pero tomando una referencia se puede asociar valor para un punto (respecto referencia).

Se calculan **expresiones para una carga**: para un sistema de cargas puntuales se aplica el principio de superposición tanto con Energía potencial como con el potencial.

$$\Delta U_{AB} = U(B) - U(A) = - \int_A^B q \vec{E} d\vec{l} = - \int_A^B KQ \frac{q}{r^2} \vec{u}_r \cdot \vec{u}_r dr = - KQq \left[ -\frac{1}{r} \right]_A^B = KQq \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Producto escalar E y dl: como es conservativo tomamos línea de campo, y son paralelos. Sentido relativo fija





signo, que está contenido en signos cargas para E y en sentido variación dr para dl.

Referencia arbitraria, pero esta expresión permite asociar valor a un punto y elegir referencia lógica A en  $\infty$ .

$$U(\infty)=0; U(r)=-\int_{\infty}^r \vec{F} d\vec{l} = \int_r^{\infty} \vec{F} d\vec{l} \quad E_p(r)=K \frac{Qq}{r}$$

**Energía potencial (eléctrica)** en un punto para una carga es:

-Cambiado de signo, W realizado **por** el campo para llevar una carga desde la referencia ( $\infty$ ) hasta ese punto.

-W realizado **por** campo para llevar una carga desde ese punto a la referencia  $\infty$ .

-W aportado (realizado externo/**contra** el campo) para llevar una carga desde  $\infty$  hasta ese punto “traerla del infinito, E aportada para crear esa configuración de cargas”

Definición validada lógicamente pensando en  $E_p$  gravitacional como mgh con referencia en el suelo, con sentido a favor del campo dirigido de arriba a abajo, por ser sentido en el que lo realiza el campo.

**Potencial** en un punto (ver definiciones  $E_p$  anteriores) es el trabajo realizado por el campo para mover una carga positiva desde ese punto a la referencia  $\infty$ , dividido por unidad de carga de prueba. Potencial es un escalar para cada punto del espacio. Uniendo los puntos con el mismo valor se forman superficies equipotenciales. (Analogía con potencial de campo gravitatorio). ; Unidades J/C = Voltio

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{-W_{AB}}{q} = \frac{\Delta U_{AB}}{q} = KQ \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) \quad V(\infty)=0 \rightarrow V_A = \frac{-W_A}{q^+} = \frac{U_A}{q^+} = K \frac{Q}{r_A}$$

Potencial tiene el mismo sentido que la carga que lo genera

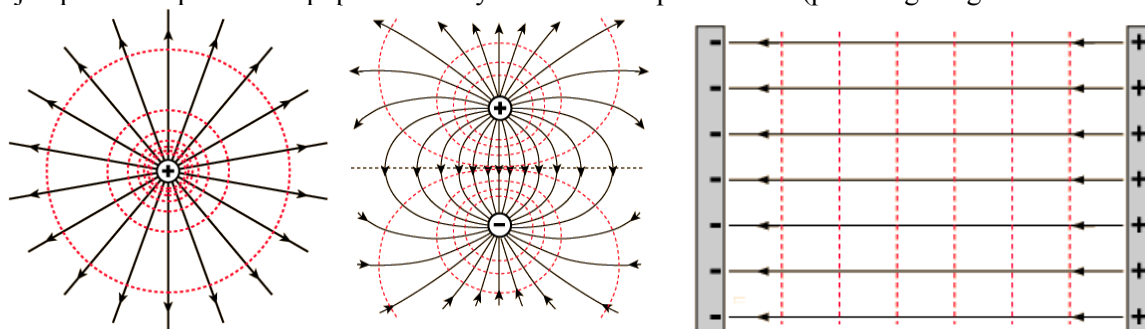
*Es un error habitual pensar que si el campo es 0 el potencial es 0, pero no tiene por qué ser así.*

### 3.3 Relación entre **intensidad de campo** y **potencial del campo eléctrico**

$$\text{grad } V = \frac{dV}{dr} = -\vec{E} \quad \text{Campo eléctrico también en V/m además N/C}$$

Gradiente del potencial (un escalar) es un vector, que es perpendicular a las superficies equipotenciales y que tiene la dirección de las líneas de campo pero sentido contrario al campo. Indica la dirección en la que el campo cambia más rápidamente.

Ejemplos de superficies equipotenciales y líneas de campo eléctrico (para carga negativa es similar a masa):



[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu), copyright

En caso de campo uniforme, la derivada se convierte en un cociente de incrementos  $\frac{\Delta V}{\Delta x} = -E$

Si tomamos  $\Delta x = x(B) - x(A) > 0$  y  $\Delta V = V(B) - V(A) > 0$ , como vector campo va dirigido hacia potenciales negativos (ver punto 3.4), el campo E va dirigido de B hacia A, que es hacia x negativas, y de ahí signo menos de E. Pero si se toma "d" como la distancia positiva de A a B, ya no está el signo menos, por lo que es habitual escribir  $\Delta V/d = E$ . Según libro/apuntes puede aparecer signo - en la fórmula, pero siempre hay que pensar los signos en cada caso; ver anexo "la fiesta de los signos"

En los apuntes de gravitación había esta frase relativa a campo que se repite y ahora se entiende mejor

*Para campo constante, analogía entre expresión gravitatoria  $\Delta E_p = mgh$  y expresión electrostática  $\Delta E_p = qEd$*   
 $\Delta E_p$  = "cantidad crea campo" · "campo constante positivo" · "distancia creciente hacia  $E_p$  mayores, distancia creciente en sentido opuesto a campo"

### 3.4 Signos **Energía potencial** y **potencial** (Ver anexo relativo a signos)

Como se ha comentado la energía potencial y el potencial están asociado a trabajo entre dos puntos y son realmente variaciones, por lo que dar valores “absolutos” implica hacerlo desde una referencia. En este apartado se pretende interpretar las variaciones de energía potencial [de una carga en movimiento en el seno de campos electrostáticos] en función del origen de coordenadas energéticas elegido, es decir, en función de la referencia tomada que hará aparecer signos.





$\Delta E_p$  positiva,  $W$  (realizado por campo) negativo, el trabajo se realiza contra el campo (es en contra campo)  
 $\Delta E_p$  negativa,  $W$  (realizado por campo) positivo, el trabajo lo realiza el campo (es a favor del campo)  
 Según def.  $E_p$  (no diferencia, ref  $\infty$ ), tendencia a que campo lleve carga a referencia  $\infty$ .  
 Se tiende a energías menores, diferencias  $E_p$  negativa.

$$E_p = \int_{pto}^{ref} F dx$$

- Para cargas positivas análogo campo gravitatorio (“se cae hacia potenciales y  $E_p$  menores”).
- Para cargas negativas, se tiende a potenciales mayores que implican menores  $E_p$  (debido al signo)
- Campo dirigido siempre hacia potenciales menores (si la carga es positiva sigue el sentido campo)

Signos y relaciones comprensibles fácilmente para campos uniformes

$$|\vec{E}| = \text{constante} \rightarrow \Delta V = E \cdot d \quad \Delta E_p = q \cdot \Delta V = q \cdot E \cdot d \quad W = -q \cdot \Delta V$$

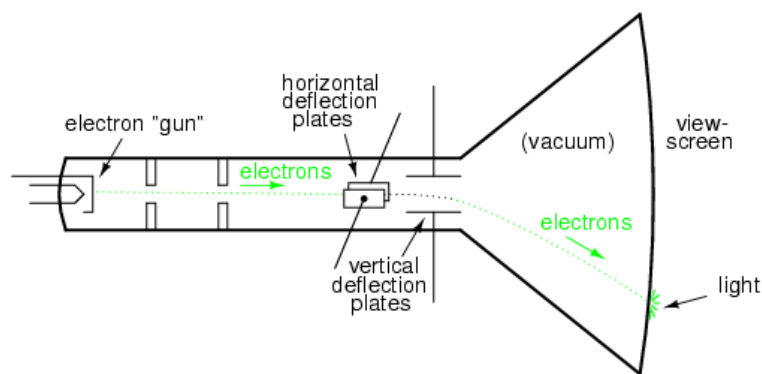
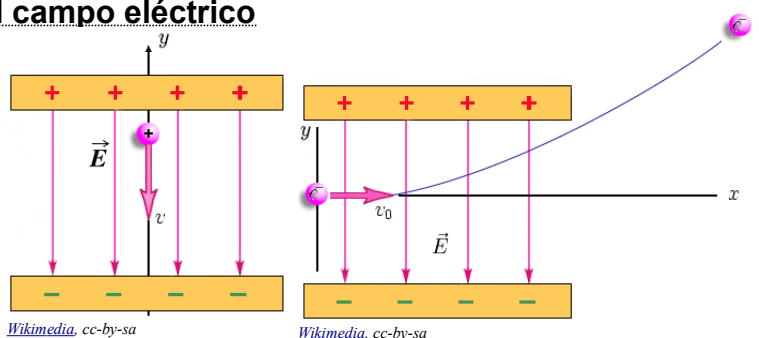
### 3.5 Movimiento de una carga en el campo eléctrico

Atención a signos carga y signos  $E_p$  y  $V$

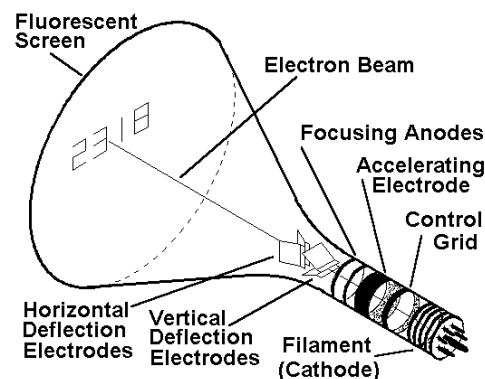
Caso habitual: campo uniforme, velocidad paralela o perpendicular al campo

Ejemplo típico partícula pasando entre placas cargadas con campo uniforme.

Mientras se mueve entre las placas el movimiento es parabólico (el campo eléctrico crea fuerza y aceleración, analogía con gravitatorio), pero fuera de las placas el movimiento es lineal.



[Tubo de rayos catódicos. ibiblio.org](http://tubo.de.rayos.catodicos.ibiblio.org)



[Tubo rayos catódicos. vcalc.net](http://tubo.rayos.catodicos.vcalc.net)

Al combinar placas verticales y horizontales se puede dirigir el electrón a cualquier punto; es la base de los tubos de televisión de rayos catódicos (algunos usan desviación con campo magnético en lugar de eléctrico).

#### 3.5.1 Electronvoltio (eV)

El electronvoltio (eV) es unidad de energía cuyo significado proviene del movimiento de partículas en el campo eléctrico; es la variación de energía asociada a mover una partícula con la carga del electrón entre dos puntos entre los que hay una diferencia de potencial de 1 voltio. Normalmente se asocia a la energía cinética que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 V; se puede asociar a la energía cinética que adquiere una masa cuando es acelerado cayendo desde cierta altura hasta el suelo (cierta distancia que para campo uniforme supone cierto potencial gravitatorio)

Numéricamente  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ : se usa el valor de la carga de electrón /protón como factor de conversión, y es una unidad de energía muy pequeña comparada con el julio

Es una unidad utilizada habitualmente en física moderna, por ejemplo para expresar el trabajo de extracción en el efecto fotoeléctrico, y en física de altas energías se utilizan multiplicadores, por ejemplo GeV.

### 3.6 Flujo eléctrico y Ley/Teorema de Gauss

El concepto de flujo es general a un campo cualquiera, se comenta para campo eléctrico  $\vec{E}$ , pero es aplicable a campo gravitatorio y campo magnético.

**Flujo de líneas de campo  $\Phi$**  a través de una superficie es el número de líneas que la atraviesan.

$\Phi = \int \vec{E} \cdot d\vec{S}$  Si el campo tiene un módulo uniforme en toda la superficie, y forma un ángulo fijo con el vector superficie, se tiene  $\Phi = E \int dS \cos \theta = E \cdot S \cdot \cos \theta$ . En el caso habitual de que el vector campo y el vector superficie sean paralelos (campo perpendicular a la superficie)  $\Phi = E \cdot S$

Unidades flujo campo eléctrico en SI:  $\text{N/C} \cdot \text{m}^2$  ó  $\text{V/m} \cdot \text{m}^2 = \text{V} \cdot \text{m}$  (no confundir con flujo campo magnético)  
 Vector superficie  $S$ : módulo igual a área, dirección normal, y sentido hacia parte convexa superficie.





$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\Sigma Q}{\epsilon_0} \quad \text{Se elige superficie de modo que E sea constante y la integral sea sencilla}$$

### 3.6.1 Teorema de Gauss como método de cálculo de campos electrostáticos

<b>Esfera</b> (carga Q distribuida uniformemente en superficie)	$E=0$ para $r < R$ ; $\vec{E} = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$ para $r > R$ (Fuera misma expresión que si fuera Q puntual)
<b>Placa/Plano</b> infinito cargado uniformemente	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$ Sentido según $\Delta V$
Campo creado por dos placas cargadas paralelas (Suma 2 placas: depende signos y valor cargas)	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ entre placas, sentido según $\Delta V$ ; $E=0$ externo (si cargas opuestas)
<b>Hilo</b> indefinido cargado uniformemente	$\vec{E} = \frac{\lambda}{2\pi r \epsilon_0} \vec{u}_r$

### 3.6.2 Jaula de Faraday. Situaciones cotidianas

El teorema de Gauss se puede utilizar para demostrar que en una zona donde no hay carga el campo eléctrico es nulo, y permite explicar que en un conductor

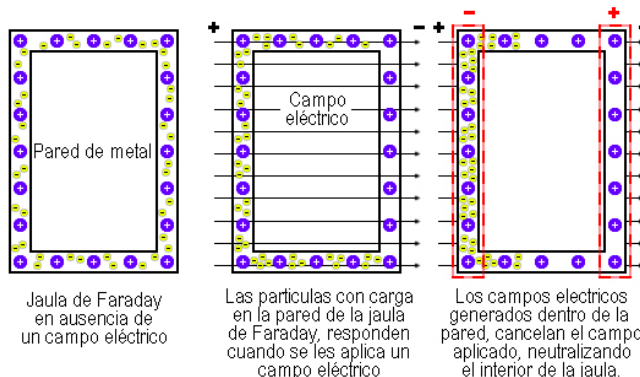
cargado en equilibrio electrostático, las cargas están en su parte exterior y la idea de la jaula de Faraday.

La jaula de Faraday es una estructura metálica que consigue que en su interior no haya campo eléctrico: protege de descargas eléctricas, y también puede aislar de radiaciones electromagnéticas. En el interior de una jaula de Faraday el campo es nulo ya que el campo externo mueve las cargas (los electrones, que son cargas que se pueden desplazar) y generan un campo interno que anula el externo y hace que el total internamente sea nulo.

Ejemplos de situaciones cotidianas:

-Mal funcionamiento de los móviles en ciertos edificios o en el interior de ascensores, o en el interior de un microondas

-Efecto de los rayos eléctricos en los aviones.



[Jaula de faraday. aviaciond.com](http://jaula.de.faraday.aviaciond.com)

## 3.7 Analogías y diferencias campos gravitatorio y eléctrico

Visión completa al comparar con campo electromagnético

Gravitatorio y eléctrico campos conservativos, fuerzas centrales, similitud leyes Gravitación-Coulomb.

Gravitatorio: fuerza siempre atractiva, intensidad no depende del medio, para cualquier objeto con masa

Eléctrico: sentido fuerza depende signos, intensidad depende del medio, sólo objetos con carga.

Gravitación y eléctrico fijan referencia de energía potencial y de potencial en infinito, pero en gravitatorio siempre son negativas, mientras que en eléctrico el signo depende del signo de las cargas.

## 4. Anexos / temas para profundizar

### 4.1 “La fiesta de los signos”

El signo no es irrelevante: poner un signo equivocado supone un error conceptual y cuantitativamente grande. El problema es comprender la gran cantidad de factores que pueden hacer aparecer signos, tanto en desarrollos teóricos como en problemas. Algunas ideas:

\*Signo negativo debido a signo cargas. Ojo a situaciones donde las expresiones tienen q y “a veces se pone signo y a veces no se pone”, ya que a veces se manejan módulos y los signos se toman de diagramas, donde ya se ha representado el vector en cierto sentido ejes coordenadas según signos de las cargas.

\*Signo negativo debido a definición  $E_p$  frente trabajo realizado por el campo.

\*Signo negativo debido a posible inversión límites/sentido integral de trabajo

\*Signo negativo debido a producto escalar entre vectores fuerza/campo y vector desplazamiento

\*Signo negativo debido a valores  $E_p$  ó V negativos al tomar en la referencia el valor 0 y a veces es máximo

\*Signo negativo debido a resultado diferencias  $E_p$  ó V entre dos puntos.

\*Signo negativo asociado a definición de gradiente, que para una dimensión es un cociente de variaciones, cada una con su signo.



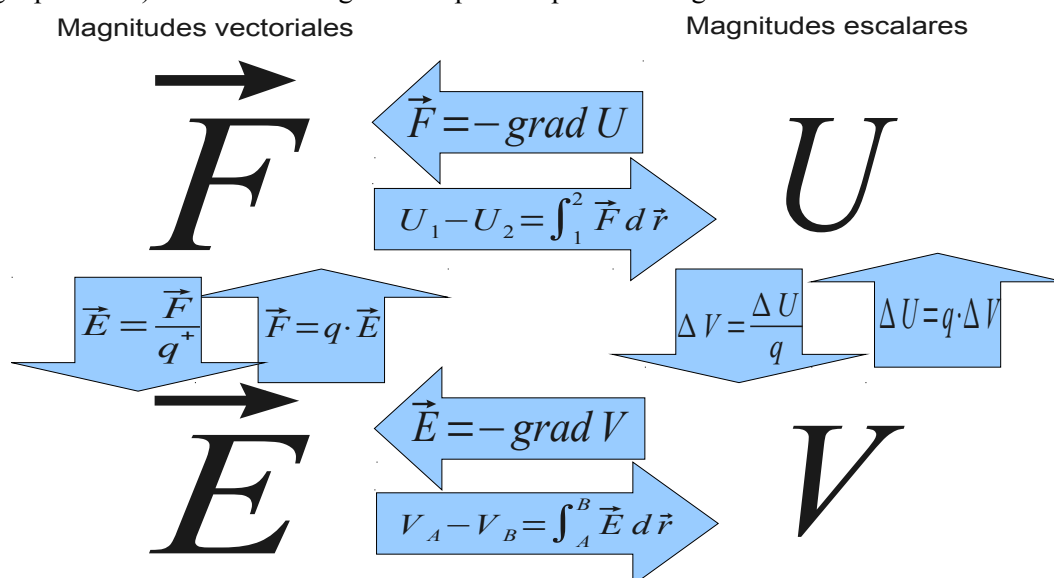




\*Signo negativo debido a criterio signo trabajo según quien lo realiza (el campo o un agente externo). Por ejemplo para el mismo movimiento de una carga se puede indicar  $W_{\text{campo}} = -\Delta E_p = -q\Delta V$  ó  $W_{\text{externo}} = \Delta E_p = q\Delta V$ . Se incluye una explicación de esta última idea, cómo interviene el signo asociado a quién lo realiza, la fuerza del campo o una fuerza externa, usando como ejemplo una situación cotidiana: puntos A y B, estando B arriba y A abajo con cierta diferencia de altura vertical, de modo que podemos usar  $\Delta E_p = mgh$  (se ve con masa pero sería equivalente a una carga positiva entre las placas de un condensador, A- abajo y B+ arriba). Al subir una partícula de masa de A a B,  $\Delta E_p$  es positivo,  $W$  realizado por el campo es negativo (el desplazamiento es en sentido opuesto a la dirección de la fuerza del campo, que es el peso, el campo no va a realizar ese movimiento espontáneamente, para que se produzca ese movimiento el trabajo se realiza externamente), pero el trabajo externo (el que se aporta externamente al campo por la fuerza que sube la masa, es positivo, la fuerza aplicada para subirlo debe ser hacia arriba y tiene el mismo sentido que el desplazamiento). Con convenio IUPAC y considerando sistemas "campo" y "partícula con masa", el trabajo externo positivo implica que la partícula aporta energía al campo (más que energía potencial de la partícula se puede ver como que queda almacenada en el campo), y que trabajo del trabajo negativo realizado por el campo sobre la partícula implica que se extrae energía por el campo, que le está cogiendo energía a la masa según se desplaza. Se trata de que si entre dos sistemas se intercambia una cantidad, lo que para uno es una variación positiva para el otro es negativa, según a quién le preguntemos.

#### 4.2 Relación Fuerza, Campo, Energía potencial y potencial

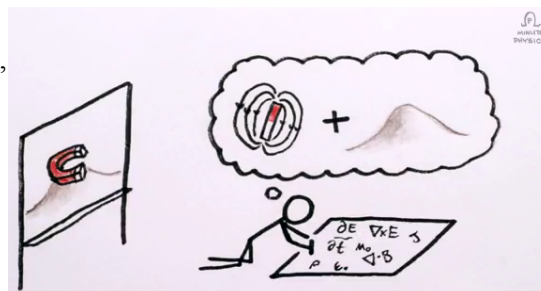
Se resumen de manera gráfica las relaciones generales, que son válidas también para campo gravitatorio cambiando carga por masa. En campo eléctrico hay que prestar especial atención al signo de las cargas. (U indica Energía potencial). Se ve como el gradiente permite pasar de magnitudes escalares a vectoriales.



#### 4.3 Concepto de campo

A veces se ven campo gravitatorio, eléctrico y magnético al tiempo para centrar la idea de campo, que es un concepto básico (ver bloques gravitación y campo magnético). Sin embargo los bloques se llaman "gravitación" y "campo eléctrico", y es con campo eléctrico cuando se trata más, enlazando con flujo y la ley de Gauss.

El concepto de campo fue propuesto por Faraday y desarrollado por Maxwell para describir el electromagnetismo, y luego ha sido revisado en física moderna (ver bloque relatividad: no es instantáneo ya que no se puede propagar a más velocidad que la luz; y bloque física cuántica: teoría cuántica de campos). El campo no es una herramienta matemática para superar la acción a distancia, sino que tiene su propia entidad; las partículas de hecho son perturbaciones del campo. Lectura para abrir la mente: "La realidad está hecha de campos, no de partículas"



Minutephysics, [Real World Telekinesis](#)

<http://francis.naukas.com/2013/12/02/francis-en-trendingciencia-la-realidad-esta-hecha-de-campos-de-particulas/>

