

# ELECTROSTÁTICA

---

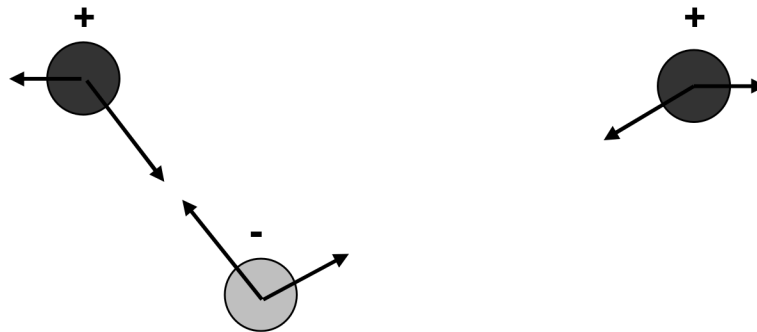
## CARGA ELÉCTRICA

Es un hecho observado desde antiguo que el frotar entre sí algunos materiales provoca la aparición de fuerzas de atracción y repulsión entre ellos y respecto de otros cuerpos. Esta fuerza es del tipo de la gravitatoria, en el sentido que actúa a distancia, aunque recordemos que aquella sólo provoca fuerzas de atracción.

Se observa el siguiente comportamiento:

- i) Si un cuerpo atrae a otros dos, éstos se repelen entre sí.
- ii) Si un cuerpo repele a otros dos, estos últimos se repelen también entre sí.
- iii) Si un cuerpo atrae a otro y repele a un tercero, estos dos últimos se atraen entre sí.

Que puede explicarse suponiendo que hay dos signos de carga posible: a los que se llama positivo y negativo. Cuerpos cargados con el mismo signo se repelen y cuerpos cargados con signos opuestos, se atraen. También se observa un efecto aditivo de las cargas, sumándose las del mismo tipo y restándose las contrarias.



A partir del conocimiento que tenemos de la estructura de la materia, podemos explicar la carga de los cuerpos por la transferencia de electrones de uno a otro. Los electrones son, en efecto, las únicas partículas cargadas que pueden cederse o aceptarse sin modificar lo fundamental de la estructura del cuerpo sólido. El hecho de frotar un cuerpo contra otro, provocaría un íntimo contacto entre ellos y proveería la energía necesaria para desprender electrones de la capa de valencia, los que podrían migrar hacia el que presentara mayor afinidad. Lógicamente el cuerpo que pierde electrones, siendo originalmente neutro, adquirirá carga positiva y lo contrario para el otro.

El otro hecho experimental relacionado con este fenómeno es que se encuentran dos clases de materiales. Una clase, compuesta por todos los metales y algunos otros materiales, permite el tránsito de cargas con gran facilidad, las que se distribuyen por todo el cuerpo hasta alcanzar (muy rápidamente) el equilibrio. Los llamamos *conductores*. La otra clase presenta un comportamiento opuesto, de tal forma que es posible observar cargas localizadas en distintas partes. Los llamamos *aislantes o dieléctricos*.

Es inmediato suponer que esta característica está relacionada con el grado de *libertad* que tienen los electrones en los distintos materiales. Diremos que los sólidos conductores poseen *electrones libres*, de los que carecen los dieléctricos. Oportunamente veremos cómo se explica la existencia o no de estos electrones libres en los diferentes materiales.

## ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO I

---

Las fuerzas que se establecen entre dos cargas, actúan a lo largo de la recta que une a las cargas y sus intensidades vienen dadas por la Ley de Coulomb:

$$F = K \frac{q_1 \times q_2}{r^2}$$

Donde  $q_1$  y  $q_2$  representan los valores de las cargas que posean los cuerpos, separados por una distancia  $r$  y de dimensiones despreciables, comparadas con  $r$  (condición que equivale a decir que los cuerpos son puntuales).  $K$  es una constante de proporcionalidad que depende del sistema de unidades. En el SI la unidad de carga se llama Coulomb (o el castellanizado Culombio), su símbolo es **C** y está definida a través de un fenómeno electrodinámico, que oportunamente describiremos. Por ahora diremos que 1 Culombio es aproximadamente la carga de  $6.2 \times 10^{18}$  electrones.

El valor de  $K$  es aproximadamente  $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$ , LO QUE LA HACE UNA INTERACCIÓN MUY FUERTE, comparada con la gravitatoria.

## EL CAMPO ELÉCTRICO

La existencia de acciones a distancia, sin ningún vínculo visible entre los actores, resultó perturbadora para la razón de los científicos que las fueron descubriendo, acostumbrados a asociar las fuerzas con el contacto físico. Una forma de explicar racionalmente lo que sucedía, fue imaginar que la entidad causante de la interacción (en nuestro caso, una carga eléctrica) actuaba sobre el espacio a su alrededor, modificándolo de alguna manera que lo hacía portador de la fuerza (creando un campo), que actuaba a su vez sobre el otro ente (la otra carga). Aunque hoy sabemos que, en realidad, lo que no existen son las fuerzas de contacto, la idea resultó extraordinariamente potente para la descripción de múltiples fenómenos naturales (y no sólo de las fuerzas). El siguiente paso para darle utilidad a la idea es asignarle al campo propiedades medibles, esto es magnitudes, que permitan la descripción y predicción cuantitativa. El valor de estas magnitudes deberá ser función de las coordenadas del punto del espacio que consideremos, de los valores de magnitudes pertinentes del ente "perturbador" y de la materia que llene el espacio y, eventualmente, del tiempo. Y si es una propiedad del campo, debe ser independiente de la otra carga. Veremos dos de estas magnitudes utilizadas en la descripción del campo eléctrico.

### INTENSIDAD DE CAMPO

Definimos *intensidad de campo eléctrico*  $E$  como:

$$E = \frac{F}{q}$$

Siendo la unidad de intensidad de campo eléctrico **N / C**.

Y comprobamos que en un punto dado del campo eléctrico, el cociente entre la fuerza ejercida y la magnitud de la carga de prueba, se mantiene constante para cualquier valor de ésta. Es decir que:

$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \dots = \frac{F_n}{q_n} = E$$

Lo que muestra que  $\mathbf{E}$  es un parámetro característico del campo creado por la *otra* carga, o por un conjunto de cargas o... por lo que sea. Es una propiedad del espacio en ese punto y tiene el valor de la fuerza que actuaría allí sobre la *carga unitaria* (positiva).

Para el caso del campo creado por una carga puntual  $Q$ , encontraremos:

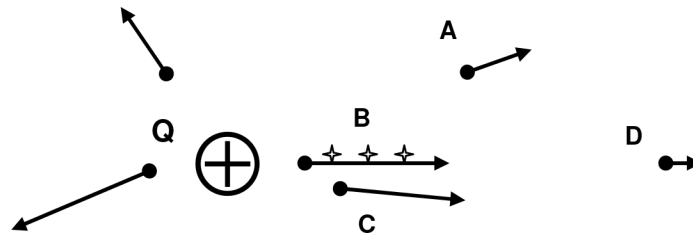
$$E = \frac{K \cdot Q}{r^2}$$

El campo eléctrico cumple el *principio de superposición*, lo que significa que la intensidad de campo debida a un conjunto de cargas es igual a la suma (vectorial, por supuesto) de las intensidades debidas a cada carga considerada aisladamente.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots + \mathbf{E}_i$$

Como antes,  $\mathbf{E}$  es una magnitud vectorial, su valor, en general, dependerá de la posición y será una característica del campo en ese punto. Podemos representarla como representamos en general los vectores, con segmentos orientados con origen en el punto, dirección de la fuerza que actuaría sobre una *carga positiva* y longitud proporcional a la intensidad.



Podemos admitir que los vectores dibujados arriba, representan el campo eléctrico<sup>1</sup> generado por la carga  $Q$ . Este es un caso muy sencillo, con simetría radial. Uno "ve" en seguida la forma del campo. No obstante, si quisiéramos representar simultáneamente los valores del campo en los puntos señalados con  $+$  ya nos encontraríamos con dificultades. Dificultades que aumentan para representar campos donde la dirección, además de la intensidad, varían punto a punto.

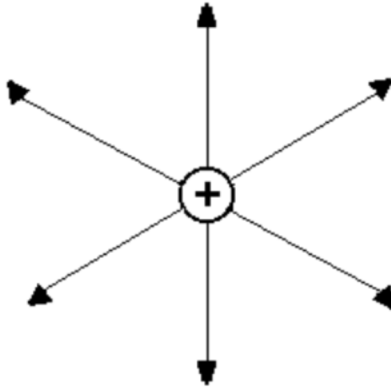
Existe otro método para describir los campos, utilizando *líneas de fuerza*. Se trata de líneas que cumplen las siguientes condiciones:

- Su dirección coincide, en cada punto, con la dirección del campo eléctrico. Esto es lo mismo que decir que, en cada punto, el vector correspondiente es tangente a la línea de fuerza.

---

<sup>1</sup> Aquí estamos usando este término como sinónimo de "intensidad de campo eléctrico", abreviación que aparece frecuentemente en los textos sobre el tema.

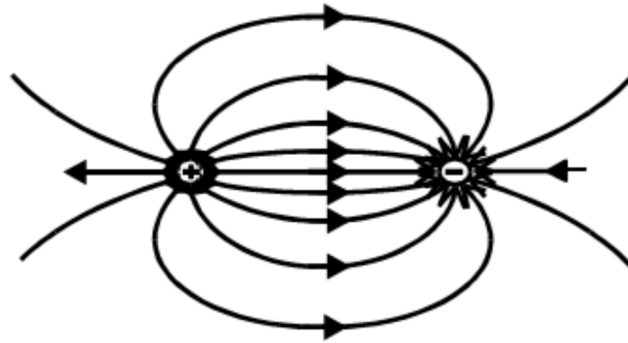
- b) Como con los vectores, una flecha indica la dirección en que se desplazaría una carga positiva.
- c) La "densidad" espacial de líneas de fuerza es proporcional a la intensidad de campo. Es decir que las líneas están más juntas donde el campo es más intenso y se separan donde es más débil.



**Las líneas de fuerza no son vectores**, aunque constituyen otro método de representar campos vectoriales. Representar el campo creado por una sola carga, como antes, no ofrece muchas dificultades. Aquí se ve con claridad, que las líneas están más juntas cerca de la carga, que es donde la intensidad del campo es mayor.

Cuando hay más de una carga, las líneas dejan de ser rectas. En el dibujo que sigue, puede comprobarse (¿cómo?) que la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba, ubicada sobre algún punto de las curvas está indicada por la dirección de la curva.

Se comprende que se pueden trazar líneas de fuerza por cualquier punto del plano (o del espacio), sólo que seleccionamos algunas de las líneas posibles y establecemos una suerte de escala de conversión entre la intensidad del campo y la densidad de líneas.



Obsérvese que en el caso de una carga aislada, las líneas se pierden en el infinito. Si la carga fuese negativa, las líneas vendrían desde el infinito y entrarían hacia la carga. En cambio, cuando hay dos cargas de distinto signo, si ambas son de la misma magnitud, todas las líneas que salen de la carga positiva, entran a la carga negativa.

Habiendo un desbalance de cargas, es decir que la carga neta del conjunto sea distinta de cero, habrá líneas de fuerza desde o hacia el infinito. Es un ejercicio mental interesante, imaginarse el campo eléctrico, originado por un conjunto de cargas, como si se estuviese observando con un zoom poderoso que permita acercarse y alejarse a voluntad.

Consideremos una superficie esférica que rodea a una carga. Según un resultado anterior la intensidad de campo es inversamente proporcional a la distancia a la carga que lo origina:

$$E \propto \frac{Q}{r^2}$$

Y la superficie de la esfera con centro en esa carga:

$$A \propto r^2$$

Entonces,

$$E \times A \propto Q$$

Pero según nuestra definición de las líneas de fuerza, resulta que la intensidad de campo es proporcional a la densidad superficial de líneas de fuerza:

$$E = \frac{N}{A}$$

Siendo N el número de líneas de fuerza que atraviesa la superficie esférica que estamos considerando. Reemplazando:

$$Q \propto N$$

O sea que al representar un campo eléctrico con líneas de fuerza, (y establecer esa "escala" de la que se hablaba más arriba) debemos tener en cuenta la magnitud de las cargas al dibujar las líneas que salen y entran de las mismas. Una generalización importante de este resultado para superficies cerradas de cualquier forma, es uno de los enunciados del importante **Teorema de Gauss**:

*La diferencia entre el número de líneas de fuerza que entran y salen a través de una superficie cerrada de cualquier forma, dentro de un campo eléctrico, es igual (o, para el caso, proporcional) a la carga neta encerrada por dicha superficie.*

## POTENCIAL ELÉCTRICO

Recordemos: La energía potencial gravitatoria puede interpretarse como la energía acumulada por un sistema como resultado del trabajo realizado sobre él. En efecto, el producto  $mxgh$ , expresión de la energía potencial en el campo gravitatorio, no es otra cosa que el producto de la fuerza ( $mxg = \text{peso}$ ) por la distancia, o sea el trabajo realizado sobre el sistema, cuando se aumenta la altura de un cuerpo, o bien el trabajo que realiza el sistema cuando la altura disminuye. En el caso más común,  $h$  representa la altura desde el nivel del suelo o, el que consideremos como origen de la energía potencial. Este origen ( $E_p = 0$ ) es siempre arbitrario, lo elegimos en función del problema que debamos resolver de forma de simplificar los cálculos.

Similarmente, el desplazamiento de una carga dentro de un campo eléctrico, implica la realización de un trabajo *por* la carga, o *sobre* la carga, dependiendo en este caso no sólo del sentido del movimiento sino también del signo de la carga en relación con la dirección del campo. Como vimos, las líneas de fuerza señalan en la dirección en que las cargas positivas se mueven espontáneamente, es decir en la dirección en que realizan un trabajo si se les permite desplazarse.

Consideremos el caso de mover, a velocidad uniforme, la carga positiva  $q$  desde **A** hasta **B**, en el esquema de abajo. Al igual que en el caso gravitatorio, este trabajo es independiente del camino recorrido y sólo depende de las posiciones iniciales y finales. Pero, salvo en el caso de un campo uniforme (como el caso gravitatorio cerca de la superficie terrestre), la variación de la intensidad de campo con la distancia, puede ser significativa.



De las definiciones de trabajo, campo eléctrico y energía potencial resulta:

$$L_{AB} = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} = q \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{x} = -\Delta E_{potAB}$$

Para resolver la integral es necesario conocer la función  $E(x)$ . Vamos a hacerlo para el caso, muy simple, del campo creado por una carga puntual. En ese caso puede aplicarse la ley de Coulomb:

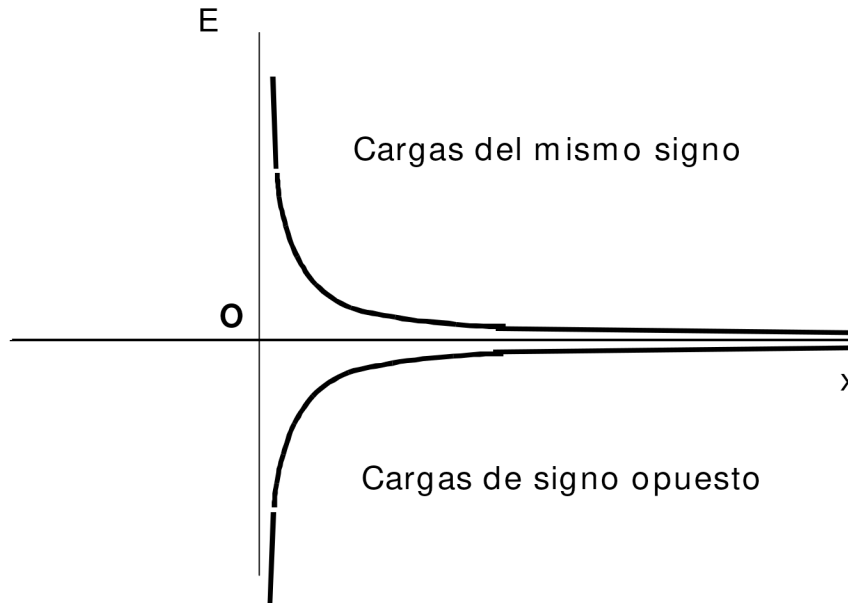
$$\Delta E_{potAB} = -q \int_A^B K \frac{Q}{x^2} dx = K \cdot q \cdot Q \left( \frac{1}{x_B} - \frac{1}{x_A} \right)$$

Analicemos el significado de la expresión que acabamos de obtener.

- i) Es una expresión para la Energía Potencial de *un sistema* de dos partículas cargadas.
- ii) Da información sobre una *variación* de energía potencial y no sobre su valor absoluto.
- iii) Si  $Q$  y  $q$  tienen el mismo signo, la energía potencial aumenta al disminuir la distancia y lo contrario si son de signo opuesto.

En otras palabras, permite calcular en cuánto varía la energía potencial (o lo que es lo mismo, el trabajo involucrado) del sistema de dos cargas puntuales, cuando su distancia varía (en A-B). Conocer el valor de la energía potencial para la configuración **A** ó **B**, implica elegir *arbitrariamente* un valor de referencia.

En los casos que analizamos del campo gravitatorio, este nivel de referencia era el del suelo, para el que establecíamos que la energía potencial valía 0. En el caso de la electrostática, es usual y conveniente establecer el valor de energía potencial 0 para la posición de *infinitamente alejado*. Entonces, si se trata de cargas del mismo signo, acercarlas incrementa la energía potencial, siendo el valor más bajo posible el de distancia infinitamente grande. Pero si son cargas de signo opuesto, el valor 0 de energía potencial es un valor máximo y acercarlas significa valores más negativos o sea un descenso de la energía potencial. Si lo representamos en un par de ejes cartesianos:



Ahora estamos en condiciones de definir una nueva magnitud, que resultará especialmente potente en el estudio de los fenómenos eléctricos. En forma análoga a la definición de  $\mathbf{E}$ , podemos definir **potencial eléctrico** en un punto, como *la energía potencial que tendría en ese punto la carga unitaria positiva*. Este valor se calcula dividiendo la energía potencial de una carga de prueba, por el valor de dicha carga.

$$V = \frac{E_{pot}}{q}$$

Como la intensidad de campo eléctrico, el potencial eléctrico es una característica del espacio en ese punto, independiente de la carga con la cual lo estoy midiendo. A diferencia del anterior, el potencial es una *magnitud escalar* y debido al principio de superposición, resulta que el potencial eléctrico debido a un conjunto de cargas es igual a la suma (algebraica) de los potenciales originados por cada carga.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_i$$

Surge de la definición que la unidad del potencial eléctrico es **Joule/Coulomb = J/C**, que recibe el nombre de **Volt** (o el castellanizado **voltio**, Símbolo SI = **V**) en homenaje a Volta, científico italiano, precursor en el estudio de los fenómenos eléctricos.

Comparemos dimensionalmente la intensidad de campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , con el potencial eléctrico  $V$ .

$$\frac{\text{Newton}}{\text{Coulomb}} = \frac{\text{Joule}}{\text{metro} \times \text{Coulomb}} = \frac{\text{Volt}}{\text{metro}}$$

Relación entre unidades que refleja una relación entre magnitudes, muy sencilla de demostrar:

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

O sea, la intensidad de campo eléctrico es igual a la derivada del potencial respecto a la distancia, cambiado de signo. Físicamente esto significa que existe campo eléctrico *en una dirección determinada* (recuérdese el carácter vectorial de esta magnitud) si hay variación del potencial eléctrico en esa dirección.

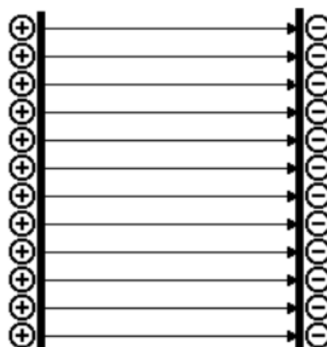
## CONDUCTORES Y AISLADORES

Veamos el comportamiento de estos cuerpos que hemos descrito brevemente al comienzo del capítulo.

Como dijimos, los conductores permiten el tránsito de las cargas, facilitando que se alcance el equilibrio eléctrico o neutralidad con gran rapidez. Todo lo contrario ocurre con los aisladores. Puesto que conocemos de la existencia de partículas cargadas dentro de todos los materiales, es lógico suponer que estas partículas, o algunas de ellas por lo menos, pueden moverse libremente en el primer caso y no en el otro. También sabemos que las partículas que llamamos electrones son, por lo menos en los sólidos, las únicas que pueden cambiar apreciablemente de posición sin alterar la estructura del cuerpo.

Un modelo que explique todos estos hechos puede ser, entonces, que los electrones de los materiales sólidos conductores puedan moverse libremente por todo el material, mientras que en los dieléctricos estén "atrapados" fuertemente por sus núcleos. En los estados líquido y gaseoso, pueden ser, eventualmente, los núcleos quienes se muevan y de hecho, materiales aislantes como la sal común, se transforman en conductores, tanto si se funden como si se disuelven. Pero a nosotros nos interesa el estado sólido, por lo que limitaremos a él nuestro análisis. Veamos qué sucede cuando colocamos distintos sólidos dentro de un campo eléctrico.

Una forma de obtener campos eléctricos intensos y homogéneos (queremos decir con esto que ***E*** sea el mismo en todo punto) es cargar dos placas conductoras extensas y próximas entre sí con cargas de signo opuesto. Este dispositivo se llama condensador o capacitor y pronto lo estudiaremos con algún detalle. Dentro de un condensador, entonces, el campo eléctrico tiene un "aspecto" como el que se muestra a continuación.



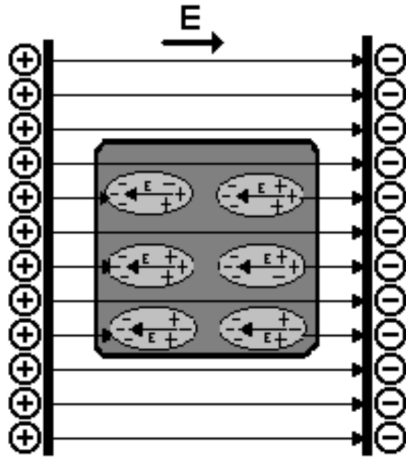
Las líneas de fuerza equi-espaciadas indican que el campo tiene la misma intensidad en todo punto. En verdad esto se cumple aproximadamente, lejos de los bordes. Para la representación se ha elegido una escala en la que, a cada carga, le corresponde una línea.



## ELECTROMAGNETISMO-ESTADO SÓLIDO I

Veamos qué sucede si colocamos distintos cuerpos dentro del campo eléctrico así obtenido.

Si el cuerpo es un dieléctrico, las cargas en su interior no pueden desplazarse con libertad. Sin embargo, hay un reacomodamiento de las mismas, debido a las fuerzas eléctricas. Como resultado, dentro del cuerpo, el campo eléctrico será la resultante del campo exterior sumado al de las propias cargas "desacomodadas". El dibujo ilustra por qué este campo es más débil que el exterior, representándose para este caso, que la intensidad del campo interior es la mitad que la del exterior del cuerpo.



*En un conductor expuesto a un campo eléctrico exterior, el campo interior resulta nulo y las líneas de fuerza en la superficie son*

En cambio, si el cuerpo es un conductor, las cargas se desplazarán libremente, empujadas por el campo, hasta lograr que en su interior el campo eléctrico se anule completamente. No puede haber campo eléctrico si las cargas se mueven libremente, de la misma manera que las moléculas de un líquido no pueden sostenerse contra la acción de un campo gravitatorio, sin las paredes de un recipiente que las sostenga.

Además, las líneas de fuerza que llegan a la superficie del conductor, deben hacerlo en forma perpendicular a la misma, pues de esta manera no hay componente de fuerza eléctrica en la superficie. Si la hubiera, las cargas libres se desplazarían hasta la posición en que el campo fuese perpendicular y ya no pudieran moverse.

*En un dieléctrico expuesto a un campo eléctrico exterior, el campo interior resulta debilitado*