Física II. CAMPO Y POTENCIAL ELÉCTRICO; LEY DE COULOMB

1. Introducción: la interacción eléctrica.

Un atributo de la materia, tan fundamental como su masa es la *carga electrica*. Al igual que la masa:

- La carga eléctrica se manifiesta en forma de *fuerzas a larga distancia* entre cuerpos.
- La carga eléctrica se conserva.

En general, las interacciones eléctricas van asociadas con manifestaciones magnéticas. Ambos tipos de fuerzas (eléctrica y magnética) están íntimamente relacionadas. El *Electromagnetismo* es la ciencia que estudia la interacción eléctrica y magnética. En todo caso, es posible estudiar separadamente la interacción electrica en cuerpos en reposo. Esto se conoce como *Electróstatica* y será el objetivo de estos primeros capítulos.

2. La carga eléctrica.

Los griegos descubrieron que al frotar un trozo de ámbar con lana, el ámbar podía atraer a otros cuerpos, y repeler a otros. De hecho, *electron* significa ámbar, en griego. Supongamos que somos unos científicos de esa época. Desde un punto de vista experimental podríamos ver que ciertos materiales al ser frotados con otros son atraídos, o repelidos; dependiendo del material frotado y del material frotador.
Podríamos hacer una categoría de materiales y una tabla de pares de materiales especificando el tipo de fuerza (atracción o repulsión) y su intensidad. Para ordernar estas fuerzas, nos sería suficiente postular que existen dos tipos de cargas: la carga *positiva* y la *negativa*. A partir de ahí, sabríamos que las fuerzas eléctricas pueden ser:

- Atractivas: si dos materiales tienen carga del mismo signo.
- Repulsvias: si dos materiales tienen carga del signo contrario.

2.1. La carga eléctrica y la estructura de la materia

Al frotar dos materiales estamos *transfiriendo carga* de un material a otro y esto induce fuerzas eléctricas. Ahora sabemos que lo que se transfiere realmente son *electrones* y que los electrones son una parte del átomo, junto con los *protones* y los neutrones.

Por convenio hemos dado a los electrones una unidad de carga negativa, mientras que los protones tienen la unidad de carga positiva.
De hecho, los electrones son la cantidad más pequeña de carga negativa que existe. Por ello, se dice que la carga esta **cuantizada**. Sin embargo, en un cuerpo macroscópico existen del orden de 10^{24} átomos (el número de Avogadro). Así pues en nuestras escalas de tamaño podemos considerar a la carga como un número continuo, no cuantizado.
Sabemos que un átomo neutro no tiene carga neta. Por tanto, tiene el mismo número de electrones que protones: éste número Z se denomina **número atómico**.
Sabemos que la masa del electrón es 2000 veces más pequeña que la del protón o del neutrón (que no tiene carga).

- masa electrón: $m_e = 9{,}109 \times 10^{-31}$kg
- masa protón: $m_p = 1{,}6726 \times 10^{-27}$kg
- masa neutrón: $m_n = 1{,}6749 \times 10^{-27}$kg

Por tanto el electrón es muy ligero en comparación al núcleo y puede ocurrir que se transfiera de un núcleo a otro, produciéndose una **ionización**. Cuando un átomo pierde un electrón se convierte en un **ión** positivo y si gana un electrón se convierte en un **ión** negativo.

La unidad de carga electrica en el sistema internacional de unidades (SI) es el **Coulomb**, C.

La *carga fundamental* o carga del electrón es la constante física que corresponde a la unidad mínima e indivisible de carga eléctrica. Como dijimos, todas las cargas observables son un múltiplo entero de esta carga. Su valor en el Sistema Internacional es, $e = 1{,}602176487(40) \times 10^{-19}$C

2.2. Sobre conductores y aislantes y las maneras de cargarlos.

Los cuerpos que conducen bien a los electrones se denominan *conductores* y a los que conducen mal *aislantes*. Los metales son buenos conductores porque algunos de los electrones de cada átomo se libera de su átomo y pasa a formar parte de una especie de nube de electrones que se mueve libremente sobre la superficie del metal. Se dice que pasa a formar parte de la *capa de conducción* del material. En los materiales aislantes apenas hay electrones en la capa de conducción. Veamos qué formas existen de cargar aislantes y conductores.

2.2.1. Formas de cargar a los objetos

Fricción. Este método es útil para cargar aislantes. Si frotamos un material con otro (por ejemplo una regla de plástico con una servilleta de papel) los electrones tienen tendencia a pasar de un material al otro. Por ejemplo frotando vídrio con seda, deja al vidrio cargado positivamente, mientras que si frotamos plástico con piel, dejaremos cargado el plástico negativamente.

Conducción. Si tocamos un conductor (como un metal) con un objeto cargado, parte de la carga eléctrica se transfiere al conductor. El resultado es que el conductor acaba cargado con el mismo signo que la carga del objeto. Este procedimiento, denominado *conducción* es útil para cargar conductores.

Inducción. Existe otro procedimento para cargar cuerpos conductores sin necesidad de tocarlos, y por tanto sin que exista transferencia de electrones del objeto cargado al conductor. Este tipo de transferencia electrónica se llama **inducción** y se explica en la figura 1.

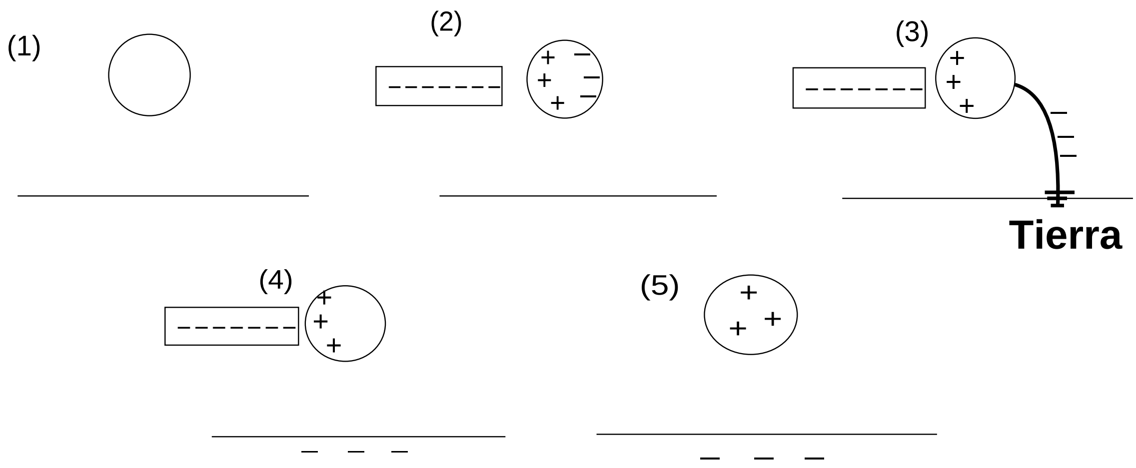

Figura 1: Carga de una esfera por **inducción.** (1) Tenemos una esfera conductura, neutra (sin carga). (2) Acercamos una barra cargada negativamente. Los electrones de la esfera conductora son repelidos por los electrones de la barra, produciéndose una *distribución de carga* en la esfera. (3) Conectamos la esfera a tierra con un cable conductor. La tierra tiene un carga neta positiva y absorbe los electrones de la esfera. (4) Al quitar la conexión a tierra, la esfera está cargada positivamente y (5) al quitar la barra las cargas positivas se distribuyen por la esfera homogeneamente. Esas cargas introducidas en la esfera (en este ejemplo son cargas positivas, es decir falta de electrones) se denominan *cargas inducidas.*

2.2.2. Formas de atracción eléctrica entre cuerpos

Entre cuerpos cargados. Los cuerpos cargados con distinto signo se atraen, mientras que si tienen cargas con el mismo signo, se repelen.

Polarización. Un cuerpo cargado también puede atraer a un cuerpo neutro mediante el fenómeno de la *polarización*. Fijaos en la parte (2) de la figura 1. Debido al exceso de electrones de la barra, los electrones de la esfera neutra cerca de la barra son repelidos hacia el otro extremo de la esfera. Lo que queda es por tanto una carga negativa de la barra frente a una carga positiva (local) en la esfera. Esto induce una fuerza de atracción entre la barra y la esfera, debido a la polarización. Este fenómeno es muy general pues ocurre incluso si la esfera es aislante. Así pues, siempre que acercamos un cuerpo cargado a otro neutro (incluso aislante) se produce una fuerza de atracción entre ambos.

3. La ley de Coulomb

La ley de Coulomb establece la relación entre las fuerzas *electrostáticas* entre dos cargas, q_1 y q_2 separadas una distancia r.

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{1}$$

En el sistema internacional de unidades (SI) la constante de proporcionalidad k tiene el valor,

$$k = 8{,}987551787 \times 10^9 \ \mathrm{Nm^2/C^2} \tag{2}$$

El valor de la constante k depende del medio (no es lo mismo la fuerza entre dos cargas en agua que en el vacío). A menudo se expresa k mediante el inverso de otra constante que se denomina de *permitividad del medio*, ϵ (también llamada constante dieléctrica).

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

Por ahora siempre consideraremos cargas en el vacío. La *permitividad del vacío* se escribe ϵ_0.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

siendo

$$\epsilon_0 = 8{,}854 \times 10^{-12}\mathrm{C^2/(N\,m^2)}$$

La permitividad del agua es muy grande (unas 80 veces mayor que la del vacío). Eso permite que se puedan disolver iones en agua sin que se vean atraídos y colapsen por su interacción electrostática: aplicación biología.

En el caso de más de dos cargas, la fuerza total sobre cada carga es la suma de las fuerzas que hace cada una sobre ella. En concreto, si hay tres cargas q_1, q_2 y q_3, la fuerza sobre la carga q_3 será la suma de la fuerza de 1 sobre 3 $\vec{F_{13}}$ más la fuerza de 2 sobre 3 $\vec{F_{23}}$. Es decir,

$$\vec{F_3} = \vec{F_{13}} + \vec{F_{23}} \tag{3}$$

La fuerza es una magnitud vectorial, como se ilustra la figura 2. Para dos cargas cualquiera q_1 y q_2, la fuerza $\vec{F_{12}}$ que hace 1 sobre 2 va en la dirección que une a las posiciones de las cargas. En el caso de tres cargas, la fuerza total sobre la carga 3 es,

$$\vec{F_3} = k\frac{q_1 q_3}{r_{13}^2}\hat{e}_{13} + k\frac{q_2 q_3}{r_{23}^2}\hat{e}_{23} \tag{4}$$

Los vectores de módulo unidad (unitarios) $\hat{e}_{12}$ nos indican la dirección de la fuerza. Dado un vector cualquiera $\vec{r}$, el vector unitario que dermina su dirección es simplemente,

$$\hat{e} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = \frac{\vec{r}}{r}, \tag{5}$$

donde $r = |\vec{r}|$ es el módulo del vector $\vec{r}$ (comprueba que $\hat{e}$ es unitario a partir de (5)). Usando el valor del vector unitario dado en (5), la ecuación (4) nos queda,

$$\vec{F_3} = k\frac{q_1 q_3}{r_{13}^3}\vec{r}_{13} + k\frac{q_2 q_3}{r_{23}^3}\vec{r}_{23} \tag{6}$$

Usando (6) podemos especificar aún más las componentes de la fuerza total sobre la carga q_3. Supongamos que todas las cargas están en el mismo plano xy. La carga q_i está en la posición $\vec{r_1} = x_1\vec{\mathbf{i}} + y_1\vec{\mathbf{j}}$ (lo mismo para q_2 y q_3), donde $\vec{\mathbf{i}}$ es el vector unitario en la dirección x, y $\vec{\mathbf{j}}$ el de la dirección y. El vector que une la carga 1 con la 3 es, $\vec{r}_{13} = \vec{r}_3 - \vec{r}_1$ (véase la figura 2). Por tanto, $x_{13} = x_3 - x_1$, $y_{13} = y_3 - y_1$. La distancia entre 1 y 3 es el módulo de $\vec{r}_{13}$. Usando el Teorema de Pitágoras [1] $|\vec{r}_{13}| = (x_{13} + y_{13})^{1/2}$. Finalmente, usando (6), la fuerza que hace la carga 1 sobre la 3 es,

$$\vec{F}_{13} = k\frac{q_1 q_3}{(x_{13} + y_{13})^{3/2}}\left(x_{13}\vec{\mathbf{i}} + y_{13}\vec{\mathbf{j}}\right) \tag{7}$$

En algunos ejercicios veremos que también es posible usar ángulos para medir las compo-

[1] 582 adC - 507 adC.

nentes de las fuerzas.

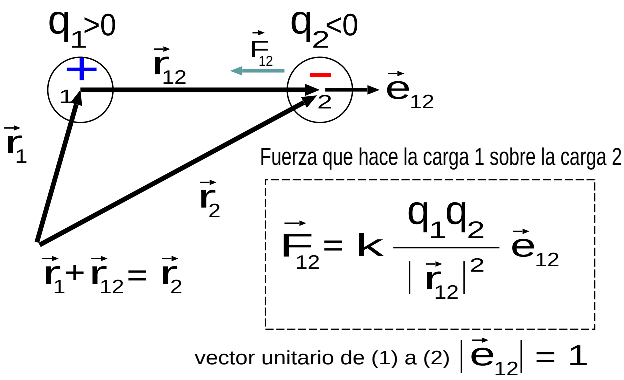

Figura 2: La fuerza de Coulomb en representación **vectorial**. La carga (1) es positiva $q_1 > 0$ hace una fuerza $\vec{F_{12}}$ sobre la carga (2) negativa $q_2 < 0$ que va en el sentido opuesto del vector $\vec{r}_{12}$ que va desde 1 a 2. Es decir, es una fuerza atractiva. Comprueba que para dos cargas del mismo signo la fuerza resulta repulsiva.

3.1. Comparación entre las fuerzas eléctrica y gravitatoria.

Para ver la relación entre ambas fuerzas, recordemos la magnitud de la fuerza de atracción gravitatoria.

$$F_g = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Fijaos que ambas fuerzas dependen del cuadrado de la distancia r^2. Por lo tanto su cociente es independiente de la distancia. Es decir, podemos comparar la fuerzas gravitatoria y la eléctrica: su relación es,

$$\frac{F_g}{F_e} = \frac{G}{k}\frac{m_1 m_2}{q_1 q_2},$$

donde $G = 6{,}67 \times 10^{-11}\mathrm{Nm}^2/\mathrm{kg}^2$ es la constante de gravitación universal. En el caso de dos cargas iguales q y dos masas iguales m, tenemos que

$$\frac{F_g}{F_e} = \frac{G}{k}\left(\frac{m}{q}\right)^2$$

CUESTIÓN

1. Calcula la relación entre la fuerza de gravedad y la eléctrica en el caso de la interacción de dos protones.
2. El caso de una masa de 1kg, cargada con 10^{-3}C.
3. Tenemos una placa cargada negativamente con $q = 10$ C y una bola conductora de m=1kg ¿ Qué carga debemos dar a la bola para que levite?

4. El campo eléctrico.

Os propongo una forma de demostrar que existe el campo gravitatorio. Dejaos caer desde el tejado de un edificio. Vais a ver que comenzareis a ir hacia abajo cada vez más rápido, acelerándoos hasta llegar al suelo. Bueno creo que mejor os lo creeis, y aceptais que existe algo que se llama "campo gravitatorio"que hace que se muevan las cosas hacia abajo. Este concepto de "campo" tan intuitivo en el caso de la gravitación también puede aplicarse en el caso eléctrico: una carga o un conjunto de cargas genera un "campo eléctrico". Para probar que existe ese campo basta poner otra nueva carga de prueba en un punto cualquiera: encontraremos que la carga se mueve por una fuerza que surge del "campo".
La fuerza que hace el campo gravitatorio sobre un objeto de masa "m" es $\vec{F} = m\,\vec{g}$. Fijaos que el vector gravedad $\vec{g}$ determina el campo gravitatorio. De un modo análogo, podemos definir el valor del campo eléctrico: una carga q en un campo eléctrico $\vec{E}$, siente una fuerza

$$\vec{F} = q\vec{E}. \tag{8}$$

Esta ecuación proporciona la definición del campo eléctrico $\vec{E}$ y además un método para calcularlo. En efecto, la fuerza que siente la carga **positiva** unidad ($q = 1$) es el campo eléctrico, pues en este caso la ecuación (8) queda $\vec{F} = \vec{E}$. Por ejemplo, veamos el campo eléctrico generado por dos cargas q_1, q_2. Para ello simplemente tenemos que calcular la fuerza $\vec{F}$ sobre una carga de prueba unidad (a la que lanzamos desde el tejado). Voy a llamar q_3 a esa carga de prueba. Haciendo $q_3 = 1$ en la ecuación (4) nos queda el campo electrico:

$$\vec{E} = k\frac{q_1}{r_1^2}\vec{e}_1 + k\frac{q_2}{r_2^2}\vec{e}_2 \tag{9}$$

donde r_1 es la distancia de la carga q_1 al punto que estamos probando. Ciertamente la fuerza total sobre la carga prueba es la suma de las fuerzas que hace q_1 y q_2. Este **principio de superposición** se aplica también al campo eléctrico. Por ejemplo fijaos que en la ecuación (9) $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, donde $\vec{E}_1$ es el campo que hace la carga q_1, etc... El principio de superposición es útil para calcular el campo eléctrico que hace un cuerpo contínuo con una distribución de carga $q(r)$. Para ello hay que usar el concepto de integral: considerándo cada trocito del cuerpo como una carga dq puntual y después sumando todos los trocitos. Matemáticamente esto se escribe,

$$\vec{E} = \int_V k\frac{\vec{r}}{r^3}dq \tag{10}$$

donde la integral se hace sobre todo el volumen V del cuerpo y hemos teniendo en cuenta que el vector unidad $\vec{e} = \vec{r}/r$.
Veremos algunos ejemplos prácticos de cálculo de campo eléctrico en los ejercicios propuestos.

4.1. El potencial eléctrico

Siguiendo con el ejemplo del campo gravitatorio, recordad que en nuestro planeta con gravedad $\vec{g}$, si un cuerpo de masa m sube a una altura h, entonces gana una energía gravitatoria $U_g = mgh$. No importa por qué camino suba o cuanta distancia haya recorrido realmente, su energía potencial solo depende del cambio de altura h. Por ejemplo si el cuerpo se desplaza un vector $\vec{\ell}$ su altura cambia $h = -\vec{g} \cdot \vec{\ell}/g$ y energía gravitatoria como $U_g = -m\vec{g} \cdot \vec{\ell}$. Podríamos definir la energía por unidad de masa, sería U_g/m. Este sería el potencial "gravitatorio" (que no es muy usado). En electrostática, el concepto de potencial es, de hecho, más usado que el de energía. De un modo análogo el potencial eléctrico se define como la energía electrostática por unidad de carga. El salto de potencial a lo largo de una trayectoria *diferencial* $d\vec{\ell}$ en un campo eléctrico $\vec{E}$ es por tanto,

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{\ell}. \tag{11}$$

Y a lo largo de una trayectoria más larga, *finita*, será

$$\Delta V = V(b) - V(a) = -\int_a^b E \cdot d\vec{\ell}. \tag{12}$$

4.2. Potencial de una carga puntual

A partir de la ecuación (9) es fácil calcular el campo eléctrico. Consideremos que sólamente tenemos una carga ($q = q_1$) en esa ecuación. Usando la ecuación (11) para obtener dV, nos queda

$$dV = -\frac{kq}{r^2}\vec{e_r} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{kq}{r^2}dr.$$

Donde $\vec{e_r}$ es el vector unidad radial (en dirección a la carga) y $dr = \vec{e_r} \cdot \vec{d\ell}$ es la componente radial de nuestra trayectoria. Es decir, al movernos una trayectoria $\vec{d\ell}$ en torno a una carga, el salto de potencial **sólo depende cuanto nos hemos alejado o acercado a la carga**, es decir de dr. Lo mismo que pasa con el campo gravitatorio. Integrando desde el punto inicial r_0 a la distancia final r, tenemos

$$V(r) - V(r_0) = \frac{kq}{r} - \frac{kq}{r_0} \tag{13}$$

Recordad que **solamente podemos obtener diferencias de potencial**. Pero, por comodidad, se suele definir $V(r_0) = 0$ y entonces,

$$V(r) = \frac{kq}{r} \tag{14}$$

A partir de (14) es fácil obtener la energía electrostática de una carga testigo q_0;

$$U = q_0 V = \frac{kqq_0}{r} \tag{15}$$

En el caso de que tuviesemos más cargas, $\{q_i\}, i = 1, \ldots, N$, podriamos hacer lo mismo para cada una, lo que nos daría,

$$V(r) = \sum \frac{kq_i}{r_i} \tag{16}$$

Donde r_i es la distancia de la carga testigo a la carga q_i. Esta es otra de las consecuencias del principio de superposición.

5. Líneas de campo y superficies equipotenciales

5.1. Líneas de campo eléctrico

El concepto de línea de campo eléctrico fue introducido por Michael Faraday (1791-1867). Es una herramienta muy útil para entender el efecto del campo en cada punto del espacio. Estas son una serie de reglas para poder dibujar líneas de campo:

1. Las líneas de campo describen el campo en cada punto del espacio.
2. Cada línea es tangente al vector campo $\vec{E}$.
3. Dos líneas de campo no pueden cruzarse pues no puede haber dos valores de $\vec{E}$ en un mismo punto.

4. La intensidad del campo (es decir, el módulo de $\vec{E}$) está representada por la densidad de líneas de campo: a mayor intensidad de E, las líneas estarán más juntas.
5. *Fuentes del campo:* Las líneas de campo **salen de las cargas positivas.**
6. *Pozos del campo:* Las líneas de campo **van a terminar a cargas negativas.**
7. El punto -4- implica que el número de lineas de campo que sale de una carga (o entra a una carga) es proporcional al valor de la carga q.
8. En el caso de un grupo de cargas q_i, $\{i = 1, 2, ..., N\}$ localizadas en posiciones $\vec{r}_i$: a largas distancias del grupo, las líneas de campo convergen a las líneas de una carga puntual con la carga total del grupo $Q = \sum_i q_i$ y localizada en el centro de cargas $\vec{r}_Q = \sum_i q_i \vec{r}_i$.

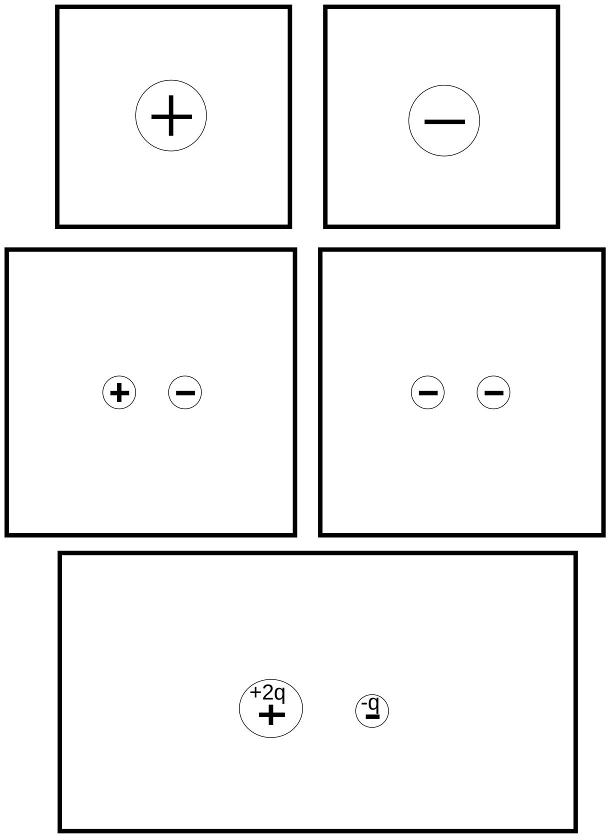

Figura 3: Algunos ejemplos de líneas de campo que se dibujarán y explicarán en clase.

5.2. Superficies equipotenciales.

Una superficie equipotencial es un lugar del espacio donde el potencial no cambia. Veamos como determinar una superficie equipotencial a partir de una línea de campo eléctrico. Recordemos que el cambio diferencial de V a lo largo de la trayectoria $\vec{d\ell}$ es $dV = -\vec{E} \cdot \vec{d\ell}$. En una superficie equipotencial $dV = 0$ y por tanto $-\vec{E} \cdot \vec{d\ell} = -Ed\ell \cos\theta = 0$. Es decir el ángulo entre el campo $\vec{E}$ y la trayectoria $\vec{d\ell}$ es de $\theta = 90^o$: nuestra trayectoria es perpendicular a las líneas del campo. Ciertamente, los vectores perpendiculares a $\vec{E}$ están todos en una superficie; esa es la superficie equipotencial. En un campo no uniforme, las superficies equipotenciales son perpendiculares a $\vec{E}$ en cada punto (véase la figura 4).

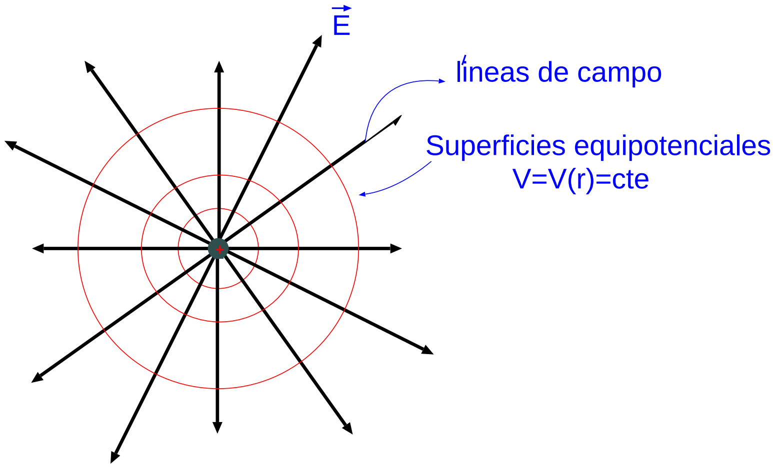

Figura 4: Las superficies equipotenciales son siempre perpendiculares a el campo eléctrico. En la figura se ilustra el campo y superficies equipotenciales de una carga positiva

6. La ley de Gauss

Carl Friedrich Gauss (1777 –1855) realizó una enorme cantidad de contribuciones en física y matemáticas. Una de ellas es la famosa ley que lleva su nombre que establece.
El flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga "q" que se encierra dentro de la superfice.
Matemáticamente,

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{q}{\epsilon_0} \tag{17}$$

Φ_E es el flujo eléctrico y ϵ_0 es la permitividad del vacío. La integral de superficie ($\oint$) recorre la superficie que encierra la carga q. El vector $\vec{dS}$ es el vector perpendicular a la superficie en cada punto de la superficie.
Parece que la ecuación (17) es algo misterioso dificil de entender. Sin embargo la ley de Gauss es muy intuitivo y útil para entender muchas propiedades *electrostáticas*, como por ejemplo cómo se distribuye la carga en cuerpos conductores.

6.1. El concepto de flujo

Pero, antes explicaremos el concepto de flujo: véase la figura 5. Fijaos que el flujo depende del producto escalar del vector campo $\vec{E}$ y del vector superficie $\vec{S}$. Es evidente: pensad que estais en un campo de balas; para que no os cruce ninguna (flujo cero), lo mejor es poner vuestra superficie perpendicular a las líneas de campo (cuerpo a tierra!). El flujo Φ puede ser negativo: fijaos en la figura para ello basta con que $\cos\theta < 0$, por ejemplo para $\theta = 180^o$, $\vec{S}$ va en sentido contrario a $\vec{E}$ y $\Phi = -ES$. Cuando $\Phi > 0$ decimos que el campo *entra* por la superficie y si $\Phi > 0$, sale.

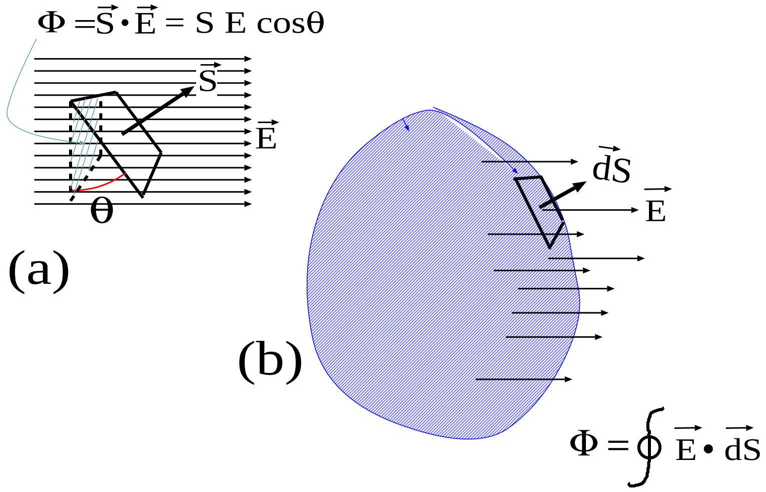

Figura 5: El concepto de flujo involucra a dos entidades: 1) campo vectorial $\vec{E}$ que describe las lineas de corriente de cualquier cosa que fluya y 2) una superficie. La superficie se describe con su vector $\vec{S}$ que es perpendicular (también denomidado "normal") a la superficie y tiene un módulo igual a el área de la superficie. (a) El flujo Φ de $\vec{E}$ a través de la superficie $\vec{S}$ es "la cantidad de E que cruza la superfice S". (b) En el caso de un cuerpo cerrado el flujo es la suma a través de la superficie de todo el cuerpo.

6.2. La generalidad de la ley de Gauss y sus aplicaciones.

La ley de Gauss es muy general porque es válidad para *cualquier* superficie que encierre a la carga, o distribución de cargas. Así pues, en los cálculos usaremos la superficie que mejor nos convenga, siempre que encierre a la carga que queremos analizar. Esta superficie se denomina a menudo *superficie gaussiana*.
Son dos los tipos de análisis que permite la ley de Gauss:

- Si conocemos la carga de un objeto, podemos calcular el campo eléctrico $\vec{E}$ a su alrededor.
- Si conocemos el campo $\vec{E}$, podemos calcular la carga del objeto.

En clase estudiaremos algunos de estos ejemplos:

1. Flujo a través de un cilindro cargado y cálculo de la carga que contiene.
2. Cálculo del campo eléctrico usando la ley de Gauss: uso de las simetrías del objeto para elegir las superficies gaussianas.
   a) *Simetría plana:* Superficie plana infinita con densidad superficial de carga σ; y dos planos infinitos con densidad superficial de carga σ.
   b) *Simetría esférica:* Corteza esférica uniformemente cargada; Carga puntual y corteza esférica; campo eléctrico en una esfera sólida cargada uniformente.
   c) *Simetría cilíndrica.* Campo eléctrico en una carga lineal infinita.

7. Propiedades electrostáticas de los materiales conductores

Estudiaremos los siguientes puntos:

1. Discontinuides del campo eléctrico.
2. El campo eléctrico es nulo en el interior de un conductor: esfera hueca.
3. Cargas en cavidades de conductores.

8. Ruptura dieléctrica

9. Campo eléctrico creado por varios tipos de objetos.

9.1. Cargas puntuales

9.2. Dipolos

9.3. Distribuciones continuas de carga

1. Anillo cargado
2. Disco uniformemente cargado
3. Plano infinito de carga
4. Interior y exterior de una corteza esférica
5. Carga lineal infinita.