

Unidad I

Electrostática

Estudio de las cargas eléctricas en estado estacionario. Las cargas pueden ser positivas (elemento a los que se le extraen electrones) o negativas, cuando poseen excesos de éstos.

Las cargas generan fuerzas entre ellas (de atracción, si son de distinto signo o de repulsión, si son de igual signo). La unidad de medida es el Coulomb que corresponde a $6,24 \times 10^{18}$ electrones, o sea 1 electrón posee una carga de $-1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb (C).

La ley de Coulomb nos da la fuerza que se genera entre dos cargas q (de atracción o de repulsión) colocadas a una cierta distancia r .

$$\vec{F} = K (q_1 q_2 / r^2) \vec{r}$$

K es la constante de C que vale $8,98 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 = 1/4\pi\epsilon_0$, donde ϵ_0 es la *permitividad del vacío* (próxima a la del aire) que vale $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, éste valor es el que puede variar, según el medio material, y hacer que la fuerza aumente o disminuya, concretamente será una de las variables que importa en un capacitor o condensador (componente eléctrico que almacena cargas) para poder almacenar más cargas eléctricas.

La ley de Coulomb es la analogía a la de gravitación universal, donde se reemplazan las cargas por masas y la constante K por la de gravitación G .

1Coulomb sería la cantidad de carga que a 1m ejerce sobre otra igual una fuerza de $9 \times 10^9 \text{ N}$!!! (aprox. 900.000.000 de kg fuerza), valor extremadamente grande, lo que me dice que las cargas estáticas se encuentra en pequeñas cantidades, mC o μC (10^{-3} o 10^{-6} C).

Propiedades de las cargas:

En un sistema aislado las cargas se conservan.

El valor de la carga no varía en un cuerpo en movimiento.

El valor de las cargas están cuantizadas (son múltiplos enteros de la carga del electrón).

Campo Eléctrico:

Las cargas generan a su alrededor líneas de fuerza (al igual que las masas), salientes de las positivas y entrantes en las negativas (siempre perpendicular a las mismas). En el caso de las masas, las líneas de fuerza son siempre entrantes.

En 1850 Faraday introdujo el concepto de Campo de Fuerzas. Existe el campo de fuerza; gravitatorio, eléctrico, magnético y el electromagnético (dentro del estudio de la Física Clásica), el primero fue visto en Física I y los otros tres los veremos en Física II.

Se define el campo eléctrico como la fuerza que existe, en un punto del espacio, por unidad de carga que se coloca en él, o sea

$$\vec{E} = \vec{F}/q \text{ (N/C)}$$

(q es una carga de prueba positiva y muy pequeña). En analogía, el campo gravitatorio se define como $\vec{g} = \vec{F}/m$ donde m es la masa de prueba (muy pequeña).

Para determinar el campo que genera una carga q debo reemplazar la fuerza (F) por la ley de Coulomb y luego simplificar la carga de prueba, quedando

$$\vec{E} = K (q/r^2) \vec{r}$$

O sea, el campo eléctrico generado por una carga q, decrece con el cuadrado de la distancia al punto en cuestión.

Las cargas pueden ser puntuales o estar distribuidas; sobre una línea, una superficie o un volumen, entonces hablaremos de, una densidad lineal de carga $\lambda = Q/\text{long.}$ (Q total de carga), una densidad superficial de carga $\sigma = Q/\text{área}$, o una densidad volumétrica de carga $\rho = Q/\text{vol.}$

Si tenemos una *distribución continua* de cargas, el campo E que produce la misma en un punto será la integración de los diferenciales de carga (lineal, superficial o volumétrica), sobre una línea, una superficie o un volumen. (\int , \iint o \iiint).

Si tenemos una *distribución discreta* de cargas habrá que hacer una sumatoria de la contribución de las n cargas al punto en cuestión.

Deflexión de un haz electrónico:

Si ingresa una carga (+) o (-) (o un haz de cargas) en un campo eléctrico E perpendicular al desplazamiento de la misma, ésta sufrirá una deflexión (desviación), producida por la fuerza del campo E, en dirección de las líneas del campo y en igual u opuesto sentido, dependiendo si la carga es (+) o (-). Dicha aceleración (a) será la fuerza que ejerce el campo eléctrico ($F = q E$) por unidad de masa de la carga, o sea $\vec{a} = q \vec{E}/m = \vec{F}/m$. Análogo a lo que ocurre cuando una masa m se desplaza perpendicular a un campo gravitatorio de aceleración a.

Ley de Gauss:

Es una de las cuatro leyes fundamentales del electromagnetismo, tomada por Maxwell para definir la teoría de ondas electromagnéticas.

Establece que la integración del flujo (\oint) (cantidad de líneas de fuerza perpendicular a una superficie) de ciertos campos (eléctrico, gravitatorio y magnético) a través de una *superficie cerrada* es proporcional a la magnitud de las fuentes (cargas, masas, imanes o electroimanes) de dicho campo, que hay en el interior de dicha superficie.

Concretamente, para el campo eléctrico (E), Gauss establece que la integral del flujo (sumatoria de líneas que ingresan y salen) sobre una *superficie cerrada* es igual a la cantidad de carga eléctrica encerrada en dicha superficie, o sea

$$\iint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_{\text{enc}} / \epsilon_0 .$$

La doble integración se realiza para determinar el valor de la superficie cerrada. Es importante marcar que tanto E como dA son vectores, con el sentido de dA saliente de la *superficie cerrada*.

Esta ley nos servirá *para definir el campo eléctrico* existente en un punto (o en una región) cuando exista una distribución continua de cargas y se pueda definir una superficie que encierre a las mismas. La superficie cerrada debe cumplir ciertas condiciones, como ser:

- el campo E debe ser constante en toda la superficie.
- E y dA deben ser paralelos, con iguales sentido ($E \cdot dA$ es máximo positivo), o sentidos opuestos ($E \cdot dA$ es máximo negativo) (recordar que en el producto punto se multiplica por el coseno del ángulo, entre E y dA).
- en partes de la superficie E y dA son perpendiculares, entonces $\cos 90^\circ = 0$ y se anula el término.

Cumplidas éstas condiciones sobre la superficie, podemos determinar el campo E como:

$$\vec{E} = q_{\text{enc}} / \epsilon_0 \bar{A} \text{Area}.$$

Observaciones:

- la ley se cumple siempre, las condiciones mencionadas son para poder extraer el campo como constante (fuera de la integral) o anular el producto de $E \cdot dA$, en ciertas partes de la superficie (para no realizar la \iint del producto vectorial $\vec{E} \cdot d\vec{A}$).
- que la $\iint E \cdot dA$ sea nula no significa que no existe E , sino que no existen cargas en el interior de la superficie, o sea, si la \iint tiene un valor, el mismo es la q / ϵ_0 .

Conductor en Equilibrio electrostático:

Si se coloca un material conductor en un campo eléctrico (E), ocurre lo siguiente:

- en el interior del mismo el campo es nulo $E=0$.
- las cargas se mantienen en la superficie del mismo (las (-) del lado que llegan las líneas del campo y las (+) del lado opuesto.
- el campo E es perpendicular a la superficie y vale $E = \sigma / \epsilon_0$
- la densidad superficial de carga σ es máxima en las puntas y en las aristas de la superficie.

Estas consideraciones son relativas a lo que se conoce como Jaula de Faraday, lugar donde no ingresa el campo E y se pueden realizar mediciones electromagnéticas con precisión.

Unidad II

Potencial Eléctrico

Se define el potencial eléctrico (V) (no confundir con potencia) como la energía por unidad de carga en un punto, es una magnitud escalar (no vectorial como el campo E), o sea

$$V = \text{energía/carga} = W / Q = \text{Joule/Coulomb} = \text{Voltio}$$

Por ejemplo una pila posee 1,5V, o sea posee una energía potencial de 1 Joule por cada Coulomb que deba mover.

Es un concepto similar al de potencial gravitatorio existente en un punto del espacio (g h) por unidad de masa, donde: $g = F/m$ es la aceleración de la gravedad y h la altura al punto en cuestión.

Si se pretende mover una carga eléctrica de prueba q (+) en contra de las líneas de un campo (E), se deberá realizar una fuerza (F), y la misma se desplazará una cierta distancia (d), lo que hará incrementar su potencial (ΔV) (ya que la carga (+) se mueve en contra de (E)), o sea

$$\Delta V = \Delta W/q = F \cdot d / q = E \cdot d / q = E \cdot d \quad (\text{donde } F \text{ es una fuerza eléctrica})$$

El incremento de potencial (en voltio) entre dos puntos es igual al campo que existe entre ambos por la distancia que separa los puntos.

Vimos que el campo (E) se mide en N/C, pero también, según ésta última igualdad en Volt/m que es una unidad más utilizada.

No confundir potencial en un punto con energía potencial, éste último involucra una carga en el punto (análogamente, no es lo mismo potencial gravitatorio en un punto con energía potencial, ésta última, involucra una masa en el punto).

El electronvolt es una unidad de medida de energía muy utilizada para la aceleración de partículas eléctricas y es la energía que se aplica a la carga de un electrón bajo una diferencia de potencial de 1 Voltio, o sea:

$$1 \text{ ev} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} \cdot 1 \text{ Voltio} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

Por ejemplo en un acelerador de partículas se utilizan entre 6 y 30 millones de ev.

Potencial de cargas puntuales (o discretas)

Si se posee una carga y se desea saber que potencial (tensión) genera en un punto del espacio debo realizar el producto del campo (E) por la distancia de la carga al punto, quedaría

$$V_A = K q/r \quad \text{potencial de } q \text{ en } A \text{ (escalar)}$$

Recordar que $E = K (q/r^2) \vec{r}$ (vectorial).

Si se posee un grupo de cargas discretas y se desea saber al potencial en un punto A, sería:

$$V_A = K \sum q_i / r_i \text{ (escalar)}$$

Como $dV = -E dl$ (l longitud), si se posee el potencial (V) en un punto y se desea saber el campo (E) asociado a dicho potencial se debe derivar el potencial respecto a la dirección en x, en y y en z,

$$\text{o sea: } E_x = -dV/dx \qquad E_y = -dV/dy \qquad E_z = -dV/dz$$

El signo menos responde al hecho que los potenciales son crecientes *en contra* del sentido del campo (recordar que la carga de prueba es (+)), y que las líneas de campo van de (+) a (-).

A la expresión dV/dl se la denomina *gradiente de potencial* de V en una dirección particular.

Superficies equipotenciales

Son superficies imaginarias donde el potencial eléctrico (V) es constante sobre la misma, por ejemplo, para una carga puntual, será un casquete esférico concéntrico con la carga. En analogía una superficie equipotencial gravitatoria sería un casquete esférico con la masa (que genera el campo) en el centro.

Mover una carga por una superficie equipotencial no involucra trabajo, lo que define que el campo eléctrico y el gravitatorio son conservativos.

Dipolo eléctrico

Las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud pero de signos opuestos son conocidas como **dipolo** eléctrico, es un sistema de dos cargas de signo opuesto e igual magnitud cercanas entre sí. Este tipo de configuración se presenta en los materiales aislantes, utilizados en los capacitores o condensadores para aumentar la permitividad () y poder almacenar más cargas eléctricas.

Al colocar un dipolo en un campo (E), se genera sobre él mismo una cupla (torque o momento) que lo reubica colineal (paralelo) con las líneas del campo. Dicha cupla es $\tau = \bar{p} \times \bar{E} = p \cdot E \cdot \cos \theta$ donde: $\bar{p} = 2aq$ (2a distancia entre cargas) y θ es el ángulo entre el campo y la línea imaginaria que une las cargas. \bar{p} tiene sentido que va de la carga (-) hacia la (+) en el dipolo.

Para realizar la mencionada cupla el campo aporta una cierta energía que es acumulada por el dipolo como energía potencial ($U = -\bar{p} \cdot \bar{E}$), ésta será la energía almacenada por un capacitor, por cada momento dipolar ($\bar{p} = 2aq$).

Unidad III

Capacitores o condensadores:

Son componentes eléctricos utilizados para almacenar cargas eléctricas y de ésta manera energía eléctrica de campo (E). Como tardan un tiempo en cargarse y descargarse son muy utilizados en circuitos eléctrico-electrónicos como elementos de temporización (marcar tiempos de activación o desactivación de elementos), para activar flashes de luz (en cámaras fotográficas), etc.

Consisten en dos superficies (de área A, cada una) conductoras paralelas, separadas a través de un material aislante (caracterizado por una permitividad ϵ), una cierta distancia (d).

Se defina la capacidad o capacitancia (C) de un capacitor como la cantidad de carga (Coulomb) que puede almacenar (en una de sus placas) por cada voltio (V) (de tensión o potencial) que puede soportar, o sea

$$C = \text{carga/tensión} = Q / V \quad (Q \text{ es en una de sus placas})$$

La unidad de medida se define como faradio (F), es un valor muy grande, por lo que comúnmente encontraremos valores de mF o μ F (milifaradio o microfaradio). O sea

$$F = \text{Coulomb} / \text{Voltio} = C / J/C = C^2/J$$

Conceptualmente un capacitor de 1 faradio de capacidad puede almacenar 1 Coulomb (de cargas) manteniendo una diferencia de tensión entre sus placas de 1 Voltio.

Recordar la definición de Coulomb.

La capacidad de un capacitor depende de sus dimensiones geométricas y de la permitividad (ϵ) del medio aislante.

En placas paralelas, la capacidad es: $C = \epsilon \text{ Área} / d$ Área de una placa.

En dos casquetes esféricos concéntricos, de radio b y a, la capacidad es: $C = \epsilon 4\pi / (1/a) - 1/b$, si el radio del casquete interior (b \rightarrow infinito), la capacidad $C = \epsilon 4\pi a$ que es la capacidad de una esfera de radio a. Por ejemplo, la tierra tiene un radio de 6.300Km, su C sería

En un capacitor cilíndrico (dos tubos concéntricos): $C = \epsilon 2\pi \text{ long.} / \ln (b/a)$ donde long. es la longitud de los tubos, b es el radio del tubo mayor (exterior) y a es el radio del tubo interior. ln es el logaritmo neperiano de base 2,7172...

Capacitores y dieléctricos:

Se denomina **dieléctrico** a un material con una baja conductividad eléctrica ($\sigma \ll 1$); es decir, un aislante, el cual tiene la propiedad de formar *dipolos eléctricos*, no todos los aislantes son dieléctricos pero sí, todos los dieléctrico son aislantes. O sea, los materiales dieléctricos son utilizados para aumentar la capacidad de los capacitores, ya que el campo E los polariza (orienta sus cargas).

Si se coloca un capacitor (vacío entre sus placa, es decir con una ϵ_0) con una tensión externa (pila, batería, etc), el mismo posee una capacidad (C_0) (en vacío), éste se cargará hasta Q_0 , manteniendo su tensión en V_0 (tensión de la pila). Si, paso seguido *se lo desconecta* y se le inserta un material dieléctrico, el campo entre sus placas disminuye y su tensión también, en un valor que depende de la *constante dieléctrica k* (del material), o sea, la nueva tensión será $V=V_0/k$ y la capacidad del mismo aumentará k veces, o sea:

$$C = k C_0 \quad K > 1$$

La *constante K* es adimensional y se encuentra tabulada en tablas de materiales dieléctricos.

Si, con la premisa anterior, pero, el capacitor *no se desconecta*, y se inserta el dieléctrico, la tensión no varía (es la de la pila), pero aumenta la carga almacenada de Q_0 a $Q = k Q_0$ lo que implica que aumenta su capacidad de C_0 a $C = k C_0$.

Polarización (P)

Es el momento dipolar, de un material dieléctrico, por unidad de volumen, o sea

$$\bar{P} = 2\bar{a}q / \text{vol. (Coul/m}^2)$$

Suseptibilidad eléctrica (χ)

Es la facilidad que presenta el dieléctrico para ser polarizado por un campo E. Es una constante adimensional que relaciona el campo E con la polarización (P), o sea

$$\bar{P} = \chi \epsilon \bar{E}.$$

En el vacío $\chi=0$, esto indica que no existe polarización (obvio, no hay materia).

Desplazamiento eléctrico (D)

Es una magnitud vectorial (de materiales isótropos, igual característica en todas direcciones) cuyo valor es el del campo E por la permitividad del medio, o sea:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad \text{pero} \quad \epsilon = \epsilon_0 (1+\chi)$$

$(1+\chi)$ se lo suele llamar *constante dieléctrica (K)* o también permitividad relativa (ϵ_r), que como dijimos figura en tablas (por ejemplo, en el vacío vale 1, en el aire 1,00051, en el teflón 2,1, en el agua destilada 78,5, etc).

Este vector (D) también puede llamarse *densidad de flujo eléctrico* o excitación eléctrica y me indica cuanto aporta la polarización del material al campo total E, o sea:

$$\bar{D} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} = \epsilon_0 \bar{E} + \chi \epsilon_0 \bar{E}.$$

También

$$\bar{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \bar{E}. \quad (\text{Coul/m}^2)$$

Campo inducido

Cuando se carga un capacitor, en el dieléctrico, los dipolos se orientan con sus cargas negativas (inducidas) hacia la placa positiva y las positivas (inducidas) hacia la placa negativa, esto tiene como consecuencia que el *campo inducido* (E_{ind}) se resta (vectorialmente) al campo del vacío E_0 quedando un campo resultante menor $E = E_0 - E_{ind}$ lo que posibilita que aumente su capacidad y pueda almacenar más cargas. La *densidad de carga inducida* (en el dieléctrico) es

$$\sigma_{ind} = (K-1/K) \sigma \quad K > 1$$

Energía almacenada en un capacitor

En un capacitor cargado existe una energía electrostática

$$U = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} C V^2 = \frac{1}{2} Q^2 / C \quad (\text{Joule})$$

dicha energía está almacenada en el campo E , ya que si reemplazamos en la segunda $C = \epsilon_0 A/d$ y $V^2 = E^2 d^2$ y definimos la *energía por unidad de volumen*, queda

$$U / \text{Vol} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (\text{Joule/m}^3)$$

Esta conclusión será retomada en el tema de ondas electromagnética ya que expresa que existe energía en el vacío, sin necesidad de cargas eléctrica, si será necesario el campo E que se generará de otra manera (sin cargas).

Conexión de condensadores

Como los condensadores poseen capacidades normalizadas, cuando se necesita un valor exacto en un circuito se recurre a la conexión entre ellos (en serie o en paralelo). También puede ocurrir que se necesite almacenar mucha energía para luego descargarla abruptamente (en un flash).

Se pueden conectar en serie, uno detrás del otro, haciendo coincidir el + de uno con el - del otro, o en paralelo donde coinciden todos los + y - entre sí.

La conexión *serie* se utiliza cuando se desea obtener *más tensión* (V) (la carga (Q) en cada uno es igual), la capacidad total (C_t) disminuye y la carga total (Q_t) también).

La conexión *paralelo* se utiliza cuando se desea obtener *más carga* (Q) (la tensión (V) en cada uno es igual), la capacidad total (C_t) aumenta y la carga total (Q_t) también. La carga de cada uno será proporcional a su capacidad.

La parte práctica de análisis de circuitos para determinar si están en serie o en paralelo es compleja y recomiendo hacer muchos ejercicios prácticos.

Para utilizar un capacitor en un circuito es necesario saber su capacidad (en Faradio) y la tensión que puede soportar (en voltios). Ambos valores vienen codificados en los mismos.