



Resumen curso completo

Electromagnetismo de Estado Sólido (Universidad Abierta Interamericana)

ELECTROSTÁTICA

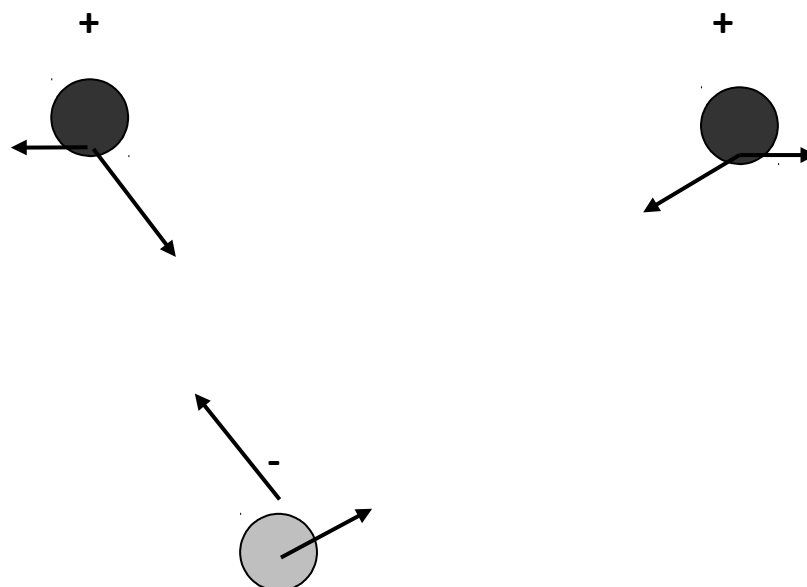
CARGA ELÉCTRICA

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.

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 6.2×10^{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

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

decir que:

Lo que muestra que 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:

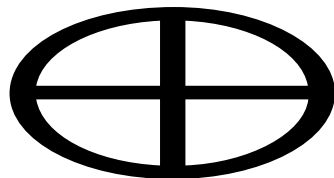
$$E = \frac{K \cdot Q}{r^2}$$


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.

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

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_i$$

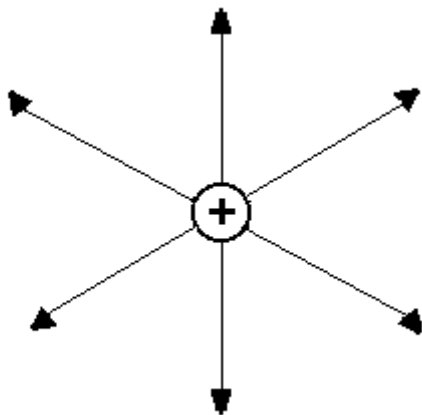
Como antes, E es una magnitud vectorial, su valor, en general, dependerá de la posición y será una característica del campo en ese punto. Podemos representarla como representamos en general los vectores, con segmentos orientados con origen en el punto, dirección de la fuerza que actuaría sobre una *carga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



Podemos admitir que los vectores dibujados arriba, representan el campo eléctrico¹ 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:

- a) 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.
- 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.



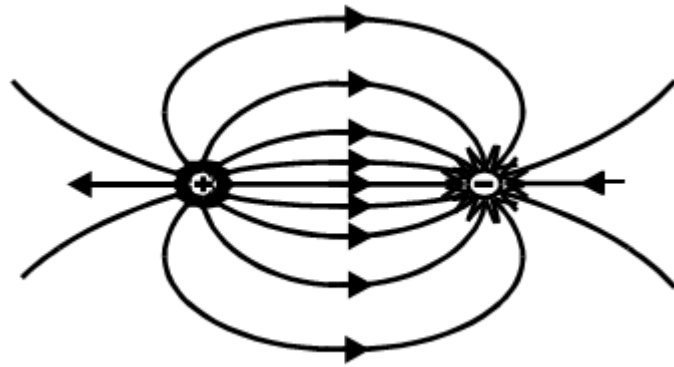
Las líneas de fuerza no son vectores, aunque constituyen otro método de representar campos vectoriales. Representar el campo creado por una sola carga, como antes, no ofrece muchas dificultades. Aquí se ve con claridad, que las líneas están más juntas cerca de la carga, que es donde la intensidad del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

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

$$1C=1A \times 1s \quad I = \Delta V \times \sigma$$

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 $m \times g \times h$, expresión de la energía potencial en el campo gravitatorio, no es otra cosa que el producto de la fuerza ($m \times g = \text{peso}$) 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:

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

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

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

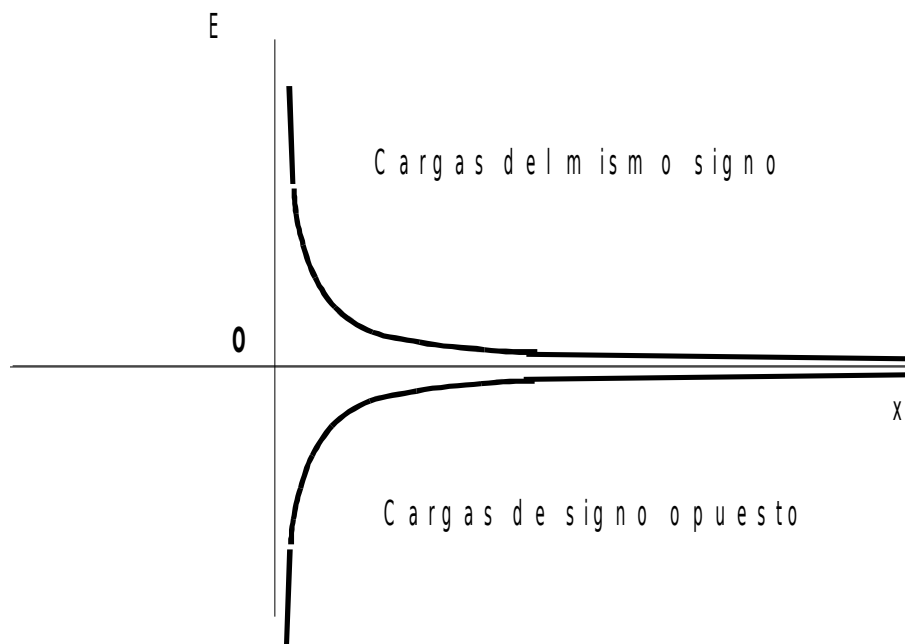
Coulomb:

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 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 E , con el potencial eléctrico V .

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

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.

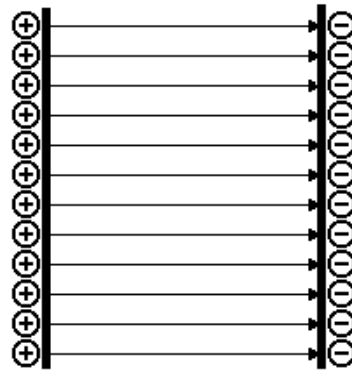
CONDUCTORES Y AISLADORES

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.

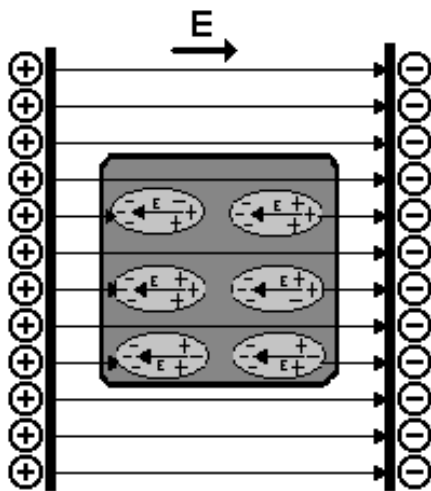
Una forma de obtener campos eléctricos intensos y homogéneos (queremos decir con esto que E sea el mismo en todo punto) es cargar dos placas conductoras extensas y próximas entre sí con cargas de signo opuesto. Este dispositivo se llama condensador o capacitor y pronto lo estudiaremos con algún detalle. 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.

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 exactamente perpendiculares a la misma

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*

LA CORRIENTE ELÉCTRICA

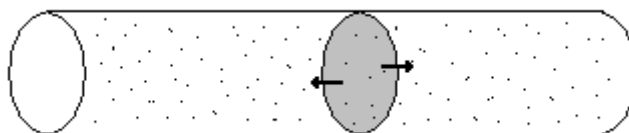
INTENSIDAD DE CORRIENTE

Diremos que existe una corriente eléctrica, en una dirección determinada, cuando ocurre un transporte *neto* de carga **positiva** a través de una sección cualquiera, en esa dirección. Acotaremos algo esta definición tan amplia, centrando nuestra atención en el proceso que ocurre en esos materiales sólidos que llamamos conductores.

En ellos, como vimos, los electrones se encuentran en un estado de “libertad” que les permite moverse por todo el material, cosa que efectivamente hacen. Pero como este movimiento es azaroso, la cantidad *net*a de carga que se mueve a través de una sección como la mostrada en el dibujo será nula.

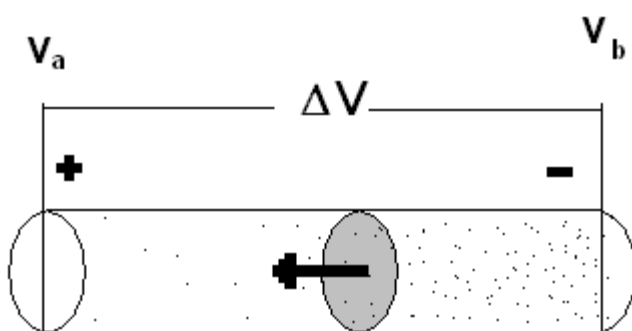
¿Cuándo entonces ocurre una corriente eléctrica en un sólido conductor?

Imaginemos la siguiente situación: Un trozo de conductor metálico, que representamos con el dibujo que sigue. Los puntitos distribuidos más o menos al azar son los electrones libres, distribuidos en forma homogénea por todo el material. Como el movimiento es aleatorio, por cualquier sección del material que consideremos, el transporte neto de carga será nulo, pues estadísticamente pasarán, en un tiempo cualquiera, tantos electrones en una dirección como en la contraria.



Ahora imaginemos que por algún medio (para el caso no importa cuál) conseguimos cambiar esta distribución homogénea atrayendo una cantidad de electrones hacia la derecha. En términos de lo que hemos aprendido en electrostática, podemos decir que el potencial eléctrico cerca del extremo izquierdo es mayor que en el lado opuesto. Es decir que habrá una

diferencia de potencial entre ambos extremos.

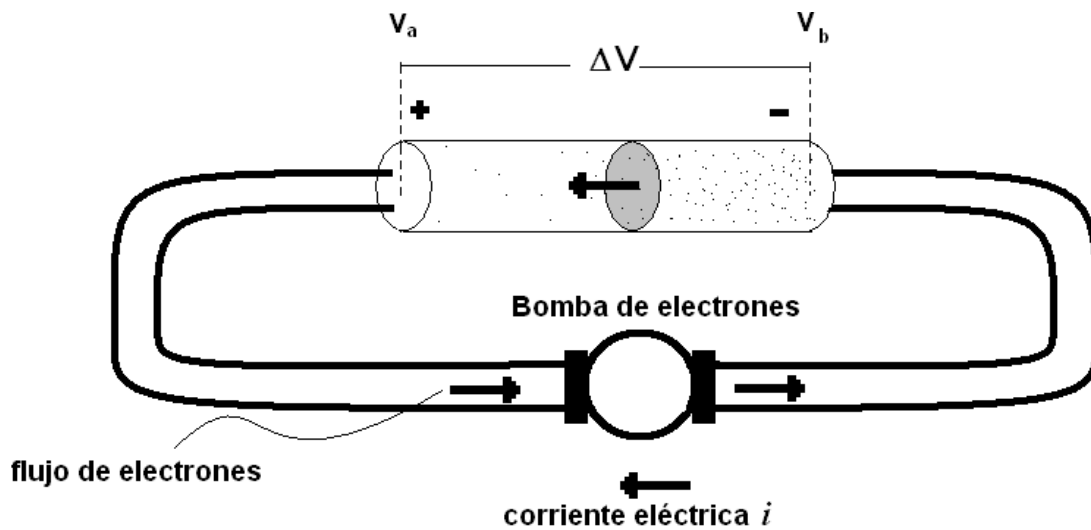


Si ahora permitimos a los electrones volver a su posición de equilibrio, habrá un transporte neto de carga **negativa** de derecha a izquierda (que es lo mismo que decir carga **positiva** de izquierda a derecha), a través de la sección marcada en el dibujo. Es decir, según nuestra definición, tendremos una

corriente eléctrica circulando de izquierda a derecha.

Claro que en las condiciones descritas, esta corriente será efímera. (Podemos visualizar a un conductor como un material incapaz de mantener una diferencia de potencial entre sus extremos, igual que un caño no puede mantener una diferencia de altura de líquidos). Muy rápidamente se alcanzará el equilibrio y el transporte de cargas cesará. Pero si mediante algún dispositivo podemos “bombear” los electrones que van llegando al extremo “a” y los devolvemos al lado “b”, de tal forma de mantener el desequilibrio en la concentración de

electrones y, con ello, la diferencia de potencial, la corriente eléctrica se sostendrá indefinidamente en el tiempo.



Tenemos entonces aquí todos los elementos que encontraremos siempre que tratemos con corrientes eléctricas:

- 1) Un camino conductor **cerrado**, es decir que forma un circuito. Este camino estará formado por cables y otros componentes conductores.
- 2) Un dispositivo, que llamaremos **fuelle**, que forma parte del circuito y que mantiene una **diferencia de potencial** que sostiene el proceso en el tiempo, entregando la energía necesaria. Estos dispositivos son de distintos tipos. La pila o batería es uno característico.

Eventualmente, habrá una llave o interruptor cuya finalidad es **abrir** el circuito para que no circule corriente y/o instrumentos de medición, pero no son esenciales.

¿Por qué es necesario entregar energía para que circule la corriente? Aquí es necesario hacer algunas consideraciones energéticas. Los electrones son acelerados por el campo eléctrico² que se ha establecido en el conductor, comenzando a transformar su energía potencial en cinética, pero su movimiento está limitado por los obstáculos que encuentran en el camino. Estos obstáculos son los núcleos de sus átomos que forman la red cristalina y los choques que se van produciendo son la causa de que los electrones cedan su energía cinética, con el resultado de un aumento en la vibración de los átomos fijos.

Este aumento de energía cinética de los átomos y moléculas de un cuerpo es lo que percibimos como un aumento de temperatura. Esta energía térmica generada cierra el balance de energía. Quiere decir que el trabajo realizado por los electrones al fluir de un punto de mayor potencial a

² En su momento habíamos visto que el campo eléctrico dentro de un conductor era nulo. Pero esto ocurre en estado de *equilibrio electrostático*. En el caso que analizamos, los electrones se desplazan hacia el equilibrio, pero la batería mantiene la situación *estacionaria*, característica de la corriente eléctrica.

$$1C = 1A \times 1s \quad I = \Delta V \times \sigma$$

otro de menor, a través de un conductor es equivalente a la energía térmica que se libera al ambiente. Debido a la interacción de los electrones con el conductor, **siempre**³, que circula una corriente eléctrica se genera calor, fenómeno que se conoce como Efecto Joule.

Hasta aquí, la descripción cualitativa de este fenómeno. Para su tratamiento cuantitativo, que es el que nos permitirá hacer predicciones y diseños, deberemos incorporar algunas magnitudes.

produce por efecto Joule, a lo largo del circuito, debe ser compensado por la fuente. (La eliminación de esta energía calórica es un

Intensidad de corriente. Ya que definimos la corriente como un transporte de cargas positivas, es lógico definir una magnitud que mida su intensidad en función de la carga transportada por unidad de tiempo. Una definición bien general sería:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

La unidad de carga ya la tenemos: es el Coulombio y la de tiempo también. Entonces, la unidad será **Coulombio / segundo** y recibe el nombre de **Ampere** o **Amperio**, símbolo SI = **A**.⁴

Esta magnitud recibe coloquialmente otros nombres: Amperaje, intensidad (a secas), corriente (a secas). **Todos estos términos son sinónimos.**

Analicemos el fenómeno con más detalle. ¿Por qué se produce el tránsito de cargas? Por la misma razón por la que un objeto cae. Porque los sistemas tienden a evolucionar hacia configuraciones de energía potencial mínima y la propia energía potencial que poseen gobierna el ritmo del proceso. Veámoslo con una analogía hidráulica, tan utilizada para modelizar procesos eléctricos. Si tenemos un depósito con agua como el de la figura, con una salida por el fondo, es fácil ver que el agua sale a un ritmo distinto al principio que al final del proceso.

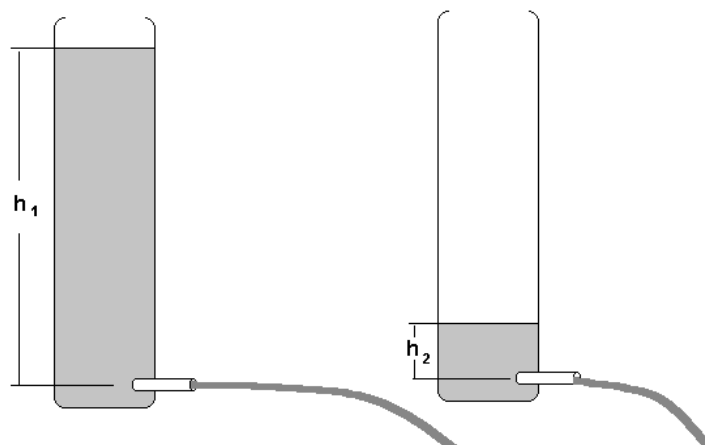
³ Esta afirmación no es cierta para los materiales conocidos como *superconductores*, pero no nos encontraremos con ellos.

$$1C = 1A \times 1s \quad I = \Delta V \times \sigma$$

⁴ En realidad, en el Sistema Internacional el Ampere es una unidad fundamental, cuyo patrón está basado en un fenómeno de fuerzas que se establecen entre corrientes eléctricas y cuyos detalles veremos más adelante. En este sistema entonces, el Coulomb es una unidad derivada del Ampere y del segundo, $1C = 1A \times 1s$

$$I = \Delta V \times \sigma$$

El caudal de agua, o sea el volumen que fluye por unidad de tiempo, depende de la altura h ,



en realidad de la diferencia de energía potencial entre el nivel superior y el de salida. Aquí podría definirse un potencial gravitatorio análogo al potencial eléctrico.

Lo mismo sucede en el dispositivo que imaginamos. La energía potencial de las cargas es muy elevada al principio, pero a medida que se distribuyen, va disminuyendo. Es un hecho experimental que la intensidad de corriente (caudal de cargas por unidad de tiempo), crece con la diferencia de potenciales entre los puntos en que ocurre el proceso. Esto nos puede hacer sospechar que la energía potencial de las cargas es también una magnitud relevante para la descripción cuantitativa. Entonces definimos:

Tensión eléctrica. Es la **diferencia de potencial** entre dos puntos de un circuito. También lo llamamos **voltaje**. **Todos estos términos son sinónimos, pero con un significado diferente que los que vimos antes.** Como ya sabemos la unidad es el **Joule/Coulombio**, que recibe el nombre de **Voltio**.

¿Cuál es la relación funcional entre la intensidad que circula y la diferencia de potencial presente? La Ley de Ohm nos da una respuesta concreta:

La intensidad de corriente que circula por un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre los extremos del mismo.

$$I \propto \Delta V$$

La constante de proporcionalidad depende del conductor en sí, a través de características que analizaremos en seguida. Antes conviene puntualizar que esta ley no tiene el carácter universal de, por ejemplo, las leyes de Newton o el Principio de Conservación de la Energía. Es una ley experimental que se cumple para gran número de materiales, *pero no para todos*. Su enunciado implica que, para un conductor dado, la relación entre ΔV e I se mantiene constante, para cualquier valor de la primera. Veremos que materiales, tecnológicamente tan importantes como los semiconductores, no cumplen esta condición.

Resistencia eléctrica. La forma más usual de la ley de Ohm suele escribirse:

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

Que caracteriza al conductor a través del parámetro R , que expresa la resistencia que opone el conductor al pasaje de la corriente⁵.

Quiere decir que la resistencia eléctrica de cualquier dispositivo o material es la relación entre la tensión que se le aplica y la corriente que deja pasar. La unidad de medida de R es, entonces, **Volt / Ampere**. Recibe el nombre de **Ohm**, (o bien **Ohmio**) y su símbolo es la letra griega omega mayúscula Ω .

R a su vez puede expresarse como una combinación de factores geométricos y de la naturaleza del material:

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

Donde ρ , llamada resistividad o resistencia específica depende de la naturaleza del material y está tabulada para muchas sustancias, lo mismo que su variación (que puede ser importante) con la temperatura. Los parámetros l y s son la longitud y la sección del conductor respectivamente.

⁵ $1C = 1A \times 1s$ Otra posibilidad es definir la conductancia σ , con lo que la ley debería escribirse:
 $I = \Delta V \times \sigma$

Es interesante observar que una consecuencia de la dependencia lineal de R con la longitud del conductor es que el potencial V , debe, a su vez, guardar la misma relación. Entonces, a lo largo de un conductor óhmico, el potencial debe variar linealmente. Pero dada la relación entre E y V :

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

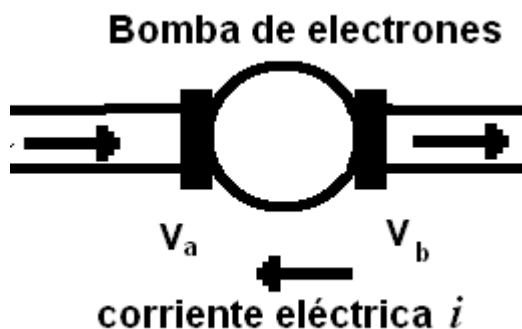
Se puede concluir que el campo eléctrico (su intensidad) es constante dentro de estos materiales. Su valor (el de la pendiente de V), será tanto menor cuanto menor sea la resistencia.

Las unidades de ρ deben ser, en consecuencia en el SI, **Ohm x metro**, aunque es frecuente encontrar tablas donde se usan otras combinaciones. Indicamos a continuación algunos órdenes de magnitud de ρ para distintos materiales:

Material	Resistividad ρ ($\Omega \times m$)
Polietileno de baja densidad	10^{19}
Vidrio	10^{12}
Madera	10^7
Silicio, Germanio	10^2
Grafito	10^{-3}
Nicrom	10^{-6}
Plata	10^{-8}
Superconductores	10^{-28}

Como se ve, entre el mejor dieléctrico y el mejor conductor hay una variación de resistividad de cerca de 50 órdenes de magnitud. Ya veremos cómo se las arregla la física para explicar este hecho.

Potencia eléctrica. Puesto que un uso fundamental del fenómeno eléctrico es la transmisión de energía, veamos cual es su relación con estas magnitudes que definimos. ¿Cómo podemos calcular el trabajo que realiza nuestra “bomba” electrónica?



Lo que hace es llevar cargas *positivas* desde el potencial V_b al V_a , para eso, debe realizar el trabajo:

$$L = \Delta V \cdot Q$$

(recordar la definición de potencial $V = L/Q$)

Si este trabajo se realiza en el tiempo t , recordando la definición de potencia:

$$P = \frac{L}{t} = \frac{\Delta V \cdot Q}{t}$$

dado que el proceso se realizó a ritmo constante, podemos llamar al cociente $Q/t = dQ/dt$, intensidad de corriente I . O sea que:

$$P = \Delta V \times I$$

Esta expresión tiene un alcance muy general ya que nos permite calcular la potencia desarrollada en cualquier proceso de transporte de cargas.

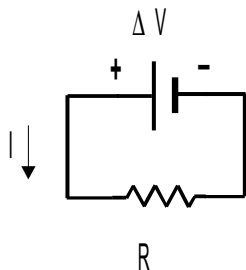
Ya vimos que la circulación de corriente por un conductor real implica la "pérdida" de energía en forma de calor. Esta energía es la que debe entregar el dispositivo que usemos para mantener la diferencia de potencial entre los extremos del conductor. El término conductor está usado en un sentido amplio que incluye, por supuesto, elementos de resistencia elevada (que son conocidos como resistores o "resistencias"), incluidos muchas veces justamente para regular la cantidad de energía que se disipará. De las relaciones vistas, podemos escribir:

$$P = \Delta V \times I = \frac{\Delta V^2}{R} = I^2 \times R$$

La última parte de esta igualdad se conoce como Ley de Joule, quien la derivó experimentalmente, aunque como estamos viendo es una consecuencia de la ley de Ohm. Conviene aclarar que éste mecanismo de transformación de energía eléctrica en otra, no es el único, sólo es el que podemos analizar con los elementos vistos hasta ahora. Tiene la particularidad de ser termodinámicamente irreversible, es decir que el calor generado no podrá ser retransformado íntegramente en energía eléctrica, estando sujeto a las limitaciones que le impone el Segundo Principio de la Termodinámica.

Sin necesidad de agregar elementos teóricos nuevos, es fácilmente comprensible que en dispositivos eléctricos que entregan trabajo mecánico (como los motores eléctricos), deben estar ocurriendo fenómenos distintos que la simple circulación de corriente por conductores.

CIRCUITOS ELÉCTRICOS



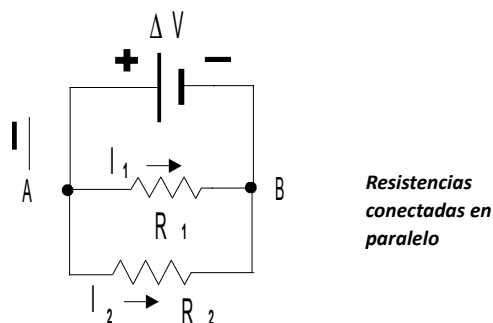
Volvamos al problema de sostener una corriente eléctrica invariante en el tiempo. Mencionamos más arriba que una forma de hacerlo es con una batería. Más adelante veremos con algún detalle en qué consiste. Entonces si conectamos cada extremo de un conductor a un borne tendremos un circuito cerrado como el que se muestra en la figura. La batería se representa mediante dos pequeñas líneas paralelas, una corta y ancha (electrodo negativo) y otra larga y fina (electrodo positivo). Entre ambos electrodos se mantiene una tensión constante. La línea fina que forma el perímetro del circuito, simboliza un conductor ideal, esto es de resistencia nula y el efecto resistivo, ya sea del conductor o de resistencias, se representa mediante el tramo de líneas quebradas. En muchos casos, suponer que los conductores tienen resistencia nula es una aproximación suficientemente buena.

*El sentido de circulación de la corriente, por fuera de la batería es, **por convención**, del borne negativo al positivo.*

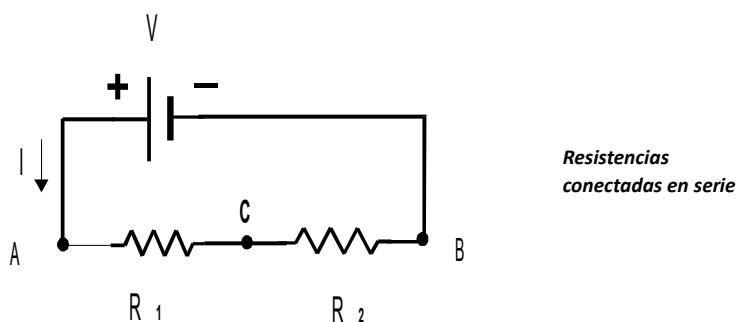
Obsérvese que este sentido corresponde al de partículas de carga positiva. En un conductor metálico, donde los portadores tienen carga negativa, *el flujo de portadores (electrones) es en sentido opuesto al de la corriente*. En otros materiales, sin embargo, existen portadores de ambos signos. Los portadores positivos se mueven en la misma dirección que, por convención, le asignamos a la corriente.

Debe comprenderse claramente que la intensidad I es, por fuerza, la misma en todos los puntos del circuito esquematizado. *Como hay un único camino para los portadores, el mismo número de portadores que pasa por un punto del circuito en un tiempo dado, pasará por cualquier otro punto.*

En cambio, lo anterior no es cierto para este otro circuito, ya que aquí hay dos caminos y, forzosamente la corriente se dividirá. Como veremos, es sencillo calcular el valor de la intensidad en cada rama, que depende de los valores de R_1 y R_2 .

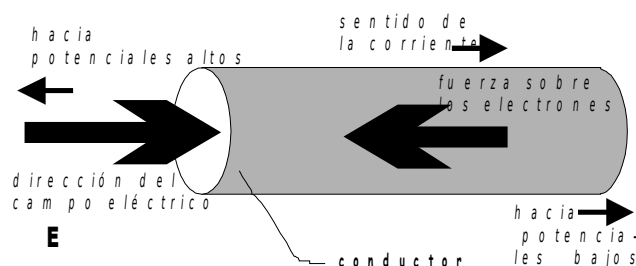


Como ya sabemos, el símbolo ΔV representa la diferencia de potencial entre dos puntos que, en este caso, son los bornes de la batería. Es común obviar el símbolo Δ y, si no hay posibilidad de confusión, reemplazarlo por V . Si es necesario indicar entre qué puntos está considerada, se agregan subíndices aclaratorios, por ejemplo V_{AB} . Observemos que los mismos componentes de este último circuito pueden conectarse de distinta manera, como se muestra aquí, donde otra vez tenemos una única posibilidad de circulación. Esta última disposición de los componentes se denomina como conexión *en serie*, mientras que en la anterior, se dice que las resistencias están conectadas *en paralelo*.



¿Qué diferencias podemos señalar entre ambas disposiciones? Podría analizarse desde distintos "puntos de vista", como ser: a) en qué afecta a los electrones; b) qué diferencias "siente" la batería; y c) qué les sucede en cada caso a las resistencias.

Caso a. Los electrones se encuentran inmersos en un campo eléctrico, cuya dirección coincide con la del circuito (lo consideramos unidimensional) y que está dirigido del ánodo (potencial más alto) al cátodo. Deben moverse, impulsados por el campo desde las zonas donde su energía potencial es más alta hacia donde disminuye. Esto implica moverse de los potenciales bajos a los altos (¿por qué?).



Dentro de la batería, otras fuerzas (cuya naturaleza no hemos visto), "les devuelven" su energía potencial. En el circuito en paralelo, parte de los electrones circularán por una rama y parte por la otra. La diferencia de potencial entre los extremos de ambas ramas es la misma, así que la proporción en que se reparten determinará la intensidad de corriente que será, en cada rama:

$$I_i = \frac{\Delta V}{R_i} \quad \text{ó} \quad I_1 = \frac{V}{R_1} \quad I_2 = \frac{V}{R_2}$$

y, por supuesto, para todo el circuito:

$$I = \sum I_i \quad \text{es decir} \quad I = I_1 + I_2$$

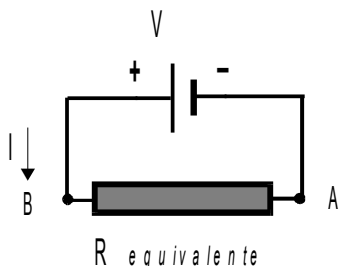
En el circuito serie, como ya analizamos, la intensidad es la misma para ambas resistencias (y para todo punto del circuito). Lo que no será lo mismo es la diferencia de potencial entre los extremos de las diferentes resistencias. En efecto, los electrones que alcanzan el punto **C**, han cedido parte de la energía potencial que tenían en **B**, a los átomos del material de **R₂** y cederán el resto a lo largo de **R₁** y lo harán en proporción directa a los valores de esas resistencias como estipula la Ley de Joule. O sea que perderán más energía potencial, cuanto mayor sea la resistencia que atraviesan. Recordando la relación entre energía potencial y potencial eléctrico, queda claro que la variación de potencial entre dos puntos, por ejemplo **B** y **C**, **V_{BC}** estará dada por la Ley de Ohm para ese tramo del circuito:

$$V_{BC} = I \times R_2$$

Similarmemente,

$$V_{CA} = I \times R_1$$

Para terminar con "el punto de vista de los electrones", analicemos cómo es el movimiento real de éstos. Vimos ya que consiste en una sucesión de aceleraciones y choques. Habría que agregar que los electrones tienen también un movimiento al azar, con el cual contribuyen a la temperatura de todo el sistema. El movimiento impuesto por el campo eléctrico se superpone a éste y en cuanto a la intensidad de la corriente eléctrica, el único que nos interesa es el primero, pues el otro al ser azaroso no contribuye, en promedio, al transporte de cargas. Un cálculo sencillo, que puede encontrarse en muchos textos de Física, muestra que la velocidad real de los electrones en la dirección del conductor es del orden de los milímetros / segundo. ¿Cómo es, entonces, que la energía puede transmitirse casi instantáneamente, a grandes distancias, mediante la electricidad? Porque lo que se propaga a lo largo de los conductores es una perturbación del estado de los electrones y esta perturbación se mueve a velocidades del orden de la de la luz (300.000 km/s).



Caso b. Para la batería la situación podría representarse según el esquema de más abajo. Es decir, la batería "no sabe" que hay más allá de sus bornes. El único efecto allí es que, *mantener la diferencia de potencial, implicará el pasaje de más o menos cargas por segundo, según la resistencia que ofrezca "la caja negra"*.

Analice y responda: Si la resistencia es mayor ¿mantener la diferencia de potencial, implicará el pasaje de más o de menos cargas por segundo?

En este caso hay diferencia, pues si suponemos que R_1 y R_2 son iguales, tendremos, en el caso del circuito serie una longitud doble, equivalente a resistencia doble. Por el contrario, en el paralelo, para la misma longitud, habrá el doble de sección, lo que significa la mitad de la resistencia.

Puede demostrarse muy fácilmente (hacerlo, para ello utilice las expresiones deducidas en el caso a) que, en general:

Conexión en serie:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_i$$

Conexión en paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i}$$

Caso c. Por último "pongámonos en el lugar" de las resistencias. Será suficiente con analizar el caso de una de ellas. Aquí otra vez tenemos que considerar que la resistencia "no sabe" qué pasa más allá de sus bornes. En el caso del circuito paralelo, entre sus extremos se mantiene



una diferencia de potencial V_{AB} y la intensidad de corriente que circula por ella, estará dada por la Ley de Ohm:

$$I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1}$$

que es la misma intensidad que circularía si no hubiese otra resistencia en el circuito⁶. Para el circuito serie la tensión entre bornes, como vimos, es menor pues:

$$V_{AB} = V_{AC} + V_{CB}$$

recuérdese el "punto de vista" de los electrones.

En consecuencia, la intensidad que circulará será menor que en el caso anterior y será la misma en todo el circuito.

REGLAS DE KIRCHHOFF

No todos los circuitos eléctricos pueden ser reducidos a combinaciones de series y paralelos. Para resolver casos más complejos, donde por ejemplo intervienen redes, son útiles las dos sencillas reglas establecidas por Gustav Kirchhoff.

- i) **La suma algebraica de las corrientes en un nodo es igual a cero.** Esto es una consecuencia del principio de conservación de las cargas, que establece que las cargas no pueden ser creadas ni destruidas. Se llama nodo a todo punto del circuito donde llegan o salen más de dos corrientes. La expresión matemática será:

⁶ $1C = 1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ En cualquier caso *real*, esto no es estrictamente cierto, ya que la respuesta de una fuente real depende de la intensidad de corriente total que debe mantener.

$$\sum I_i = 0$$

Y para aplicarla debe establecerse una convención sobre los signos de las corrientes. Por ejemplo se le asigna signo positivo a las corrientes que llegan a un nodo y negativo si salen de él.

- ii) **La suma algebraica de todas las variaciones de potencial, alrededor de una malla es igual a cero.** Esto es una consecuencia del principio de conservación de la energía. Una malla es un circuito cerrado elemental. O sea:

$$\sum \mathcal{E} - \sum R_i \cdot I_i = 0$$

Aquí debe tenerse en cuenta la polaridad de las fuentes de \mathcal{E} y, otra vez, el sentido de circulación de la corriente para decidir el signo de los productos $I \cdot R$. Pero ocurre que en circuitos no muy complejos, ya es imposible decidir a simple vista el sentido de circulación en algunas ramas. Esto no tiene importancia, pues uno supone un sentido y aplica su suposición en forma coherente, tanto para la regla i) como ii). Al resolver las ecuaciones las corrientes que aparecen con signo positivo, coincidirán con las suposiciones hechas y lo contrario si aparecen con signo negativo.

Para resolver un circuito utilizando Kirchhoff, se lo descompone en tantos circuitos elementales, como sean necesarios para poder plantear un sistema con tantas ecuaciones independientes como incógnitas.

PILAS Y BATERÍAS

Estos son dispositivos electroquímicos que mantienen una diferencia de potencial constante entre dos bornes. El de potencial más alto se llama ánodo y se lo nombra también como electrodo positivo. El otro es el cátodo. Suele llamarse pilas a los dispositivos que tienen un solo elemento electroquímico y batería al que consta de un conjunto de ellos, pero esto no es riguroso.

Algunos son recargables, mientras que otros, una vez agotada su carga deben ser desechados. Todas se basan en el mismo principio de funcionamiento: En esencia se trata de dos reacciones químicas que producen cargas eléctricas opuestas y no pueden progresar hasta que no se pongan en contacto eléctrico ánodo y cátodo. Cuando esto se hace, la reacción se produce liberando energía en forma de potencial eléctrico.

Los bornes son las terminales de electrodos que consisten en un conductor en contacto con el medio donde se producen las reacciones químicas. Frecuentemente, este medio es una solución salina, que recibe el nombre de *electrolito*. El ánodo es de un material tal que, en contacto con la solución se carga positivamente y lo contrario ocurre con el cátodo. En los dispositivos y mecanismos que, como éstos, transforman otras formas de energía en tensión eléctrica, se denomina a ésta como fuerza electromotriz. Éste es un nombre desafortunado ya que no se trata de una fuerza, pero... se sigue usando, generalmente abreviado como *fem* (o *emf* en inglés).

En las recargables, el pasaje de una corriente eléctrica, hace "retroceder" las reacciones, regenerando las condiciones iniciales. De todas formas este ciclo se puede repetir un número variable de veces, hasta que el dispositivo deja de funcionar para siempre.

La tensión eléctrica típica que produce un elemento electroquímico es del orden de 1,5 V, por eso, en las baterías se disponen en serie hasta alcanzar el valor requerido. En las baterías de automóvil, por ejemplo, cada elemento es uno de los vasos o compartimientos cuyo estado se controla, cuidando el nivel de electrolito, etc.

Puesto que las baterías y pilas entregan energía haciendo reaccionar sustancias que contienen en su interior, se comprende que la cantidad de energía que pueden entregar está en relación con la cantidad de reaccionantes que puedan contener y de allí con su tamaño. La relación energía / tamaño (peso y volumen) es una limitación importante a la posibilidad de desarrollo de vehículos eléctricos, dado que el contenido energético de los combustibles fósiles es muy superior.

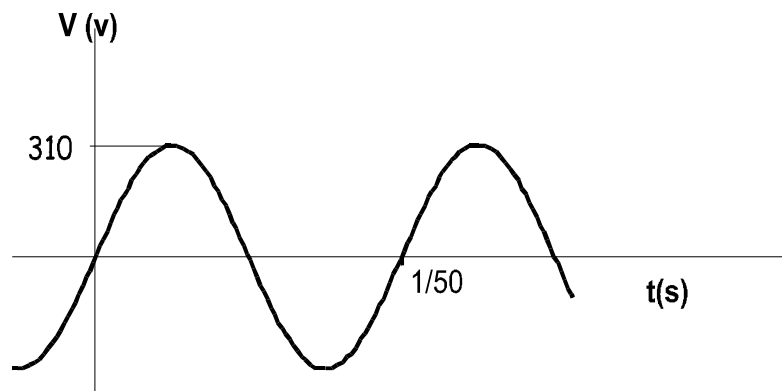
La "capacidad⁷" de una batería suele expresarse en términos de la cantidad total de carga eléctrica que puede transferir y para ello se utiliza la unidad **Ampere-hora**, (cuyo significado físico es: **Axh** o sea intensidad x tiempo = carga eléctrica o "cantidad de electricidad"). Conocida la intensidad de corriente necesaria para alimentar un circuito y la capacidad de la batería, es inmediato calcular durante cuánto tiempo podremos operar el circuito.

⁷ $1C = 1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ Entrecomillamos el término para diferenciarlo de la magnitud capacidad eléctrica. Analícese cuidadosamente cuál es la diferencia.

CORRIENTE ALTERNA (CA)

Hasta ahora, hemos considerado circuitos donde la intensidad de corriente es constante en el tiempo. A esto es lo que se llama corriente continua. (Se la abrevia como CC, aunque también es de uso común la abreviatura DC, del inglés Direct Current). Sin embargo, no es ésta la única posibilidad, ni siquiera es la más importante. La energía eléctrica que se distribuye por las redes no es de este tipo, sino que es corriente alterna (CA o AC). Su característica es que tanto la intensidad como la tensión varían en el tiempo según una función sinusoidal. En el gráfico siguiente se representa la tensión en función del tiempo para la corriente que se distribuye por la red domiciliaria en nuestro país.

Hay fenómenos complejos y tecnológicamente muy importantes asociados con la CA. Oportunamente volveremos sobre el tema; mientras tanto, observemos que el clásico valor "220V" no parece corresponder con ningún valor especial de la tensión. El valor $1/50$ s, que corresponde a una oscilación completa de la tensión, está indicando que en un segundo se realizan 50 oscilaciones. Esto significa que la frecuencia es de 50 Hz, el otro parámetro característico de nuestro servicio eléctrico.



CAPACITORES

1. INTRODUCCIÓN

2. DEFINICIÓN Y CONCEPTO DE CAPACIDAD ELÉCTRICA.

Los capacitores son dispositivos utilizados para almacenar cargas. Consisten en dos placas separadas por un material dieléctrico. Al unirlos a los bornes de una batería se obliga a un tránsito de cargas de una a la otra, hasta que cada placa alcanza el potencial de la fuente a la que está conectada. O sea, se logra la separación de cargas positivas y negativas. El dieléctrico impide que vuelvan a juntarse y es posible desconectar el capacitor de la fuente y conservar la carga (por lo menos durante cierto tiempo). Está claro en esta descripción, que la carga total del dispositivo es nula.

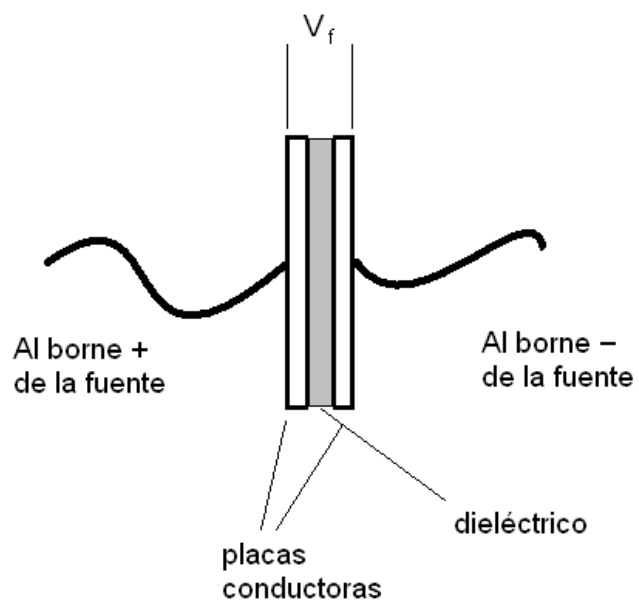


Figura 4.1. Esquema típico de un capacitor

Por supuesto, que al cargarse, las placas adquieren entre ambas magnitudes?

Llamaremos carga del capacitor (Q) a la carga de la placa positiva

Llamaremos tensión del capacitor (V) a la diferencia de potencial

Llamaremos Capacidad o Capacitancia (C) de un capacitor a la relación Q/V que se establece entre la carga que contiene y la tensión entre placas.

Es intuitivamente aceptable y fácilmente demostrable que la diferencia de potencial entre ambas placas es directamente proporcional a la carga adquirida por el dispositivo.

$$C = \frac{Q}{V}; V = \frac{Q}{C}; Q = C \times V \quad (4.1)$$

La siguiente argumentación aporta ideas para la comprensión de la relación entre C , V y Q :

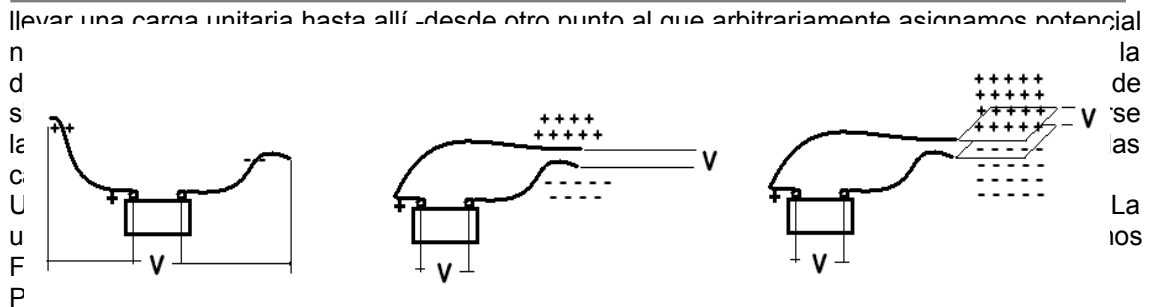
Recordando que el potencial de un punto del campo eléctrico es igual al trabajo necesario para

Un cable conectado al borne positivo de la batería, alcanza la misma tensión respecto de otro, conectado al negativo, que la tensión entre

Magnitud	Símbolo	Unidad	Símbolo (SI)
Capacidad	C	Faradio	F

A medida que aproximamos los cables entre sí, las cargas de distinto signo tienden a neutralizarse y se irán acumulando más y más, manteniéndose siempre la tensión.

Si ahora soldamos sendas placas a los cables, las cargas podrán distribuirse sobre la superficie y mantener la misma tensión significará mayor cantidad de cargas sobre las placas.



Resumiendo:

Tabla 4.1. Unidades y magnitudes de los capacitores

- 1) Existe una propiedad de los capacitores cuyo valor es *independiente* de la tensión aplicada.
- 2) La carga máxima de un capacitor estará determinada por la máxima tensión que soporte sin que se “rompa” el dieléctrico.

El significado conceptual de la magnitud “capacidad”, no se refiere a cuánta carga puede almacenarse en el dispositivo, sino estrictamente a la relación entre la carga almacenada y la tensión alcanzada.

3) A mayor capacidad, mayor carga acumulada para una dada tensión.

Por el razonamiento cualitativo que hicimos, podemos entender que la capacidad depende de las dimensiones. Aumentará al disminuir la distancia entre placas y con el aumento de la superficie de éstas. En efecto, para un capacitor de placas paralelas, como el que describimos resulta que:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4.2)$$

Donde A es el área de las placas, d la distancia entre ellas y la constante de proporcionalidad ϵ , *capacidad específica de inducción*, es una característica del dieléctrico, que conviene expresar en función de ϵ_0 , permitividad del vacío (ver ec.(1.4)):

$$\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0 \quad (4.3)$$

ϵ_r se encuentra en tablas para una amplia lista de materiales con el nombre de *constante dieléctrica*, aunque su fuerte dependencia con la temperatura y aún con E , hacen poco adecuado ese nombre, siendo preferible el de *permitividad relativa* o *coeficiente dieléctrico*. Mostramos algunos valores en la Tabla 4.2.

Material	ϵ_r	$\epsilon \cdot 10^{12} \text{ (C}^2/\text{N.m}^2\text{)}$
Vacío	1	8,85
Aire (1 atm)	1,00059	
Agua	81	717
Azufre	4	35
Vidrio	5-10	45-90
Cerámica	6-7	53-62
PVC	3,5	31
Teflon	2,1	18,6
SiO ₂ (dióxido de silicio)	3,9	34,5
Mica	3,6	31,5
Polietileno	2,2	19,4
Alúmina	3,1	27,4
Papel Tisú	3,5	31

Tabla 4.2. Valores aproximados de permitividad relativa y capacidad específica

Obsérvese el valor relativamente alto de permitividad que presenta el dióxido de silicio. Esto tiene mucho que ver con el uso masivo del silicio como semiconductor.

Por supuesto, de acuerdo con la

descripción del comportamiento de los sólidos en un campo eléctrico (Unidad I, secc. 4.1), cualquier material debe tener mayor permitividad que el vacío, (o sea $\epsilon_r > 1$) de lo que se deduce que la incorporación de un dieléctrico siempre aumenta la capacidad. En los capacitores el dieléctrico cumple además un papel mecánico al mantener separadas las placas conductoras a muy corta distancia.

El Faradio es una unidad extremadamente grande, como lo es el Culombio; la capacidad de la mayoría de los capacitores se mide en

micro o nano faradios. Sin embargo, la multiplicación de los usos de los artefactos eléctricos, promovió la investigación para el desarrollo de dispositivos de mayor capacidad. En la actualidad la tecnología de doble capa electroquímica (EDLC) permite disponer de capacitores comerciales del orden de los 5000F y más (ver sección 6.3). Se investiga el desarrollo de ultra capacitores basados en las extraordinarias propiedades de los nanotubos de carbono.

3. ENERGÍA ALMACENADA EN UN CAPACITOR

Ya que cargar un capacitor insume trabajo, puede considerarse al dispositivo como un contenedor de energía, además de cargas. Calcular la energía contenida en un capacitor cargado supone considerar el trabajo realizado durante la carga. Éste consiste en el transporte de la carga Q de una placa a la otra, a través de una diferencia de potencial V . De la definición de potencial, tenemos que para una pequeña carga dQ :

$$dL = V \times dQ \quad (4.4)$$

Y por las relaciones (4.1), resulta:

$$E = \int dL = \frac{1}{C} \int Q \cdot dQ = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (4.5)$$

que, por supuesto, también puede escribirse:

$$E = \frac{1}{2} V^2 \times C \quad (4.6)$$

O

$$E = \frac{1}{2} Q \times V \quad (4.7)$$

La ec. (4.6) será la que usemos más frecuentemente, ya que tensión y capacidad serán los datos que tendremos más a mano casi siempre.

Ejercicio 4.1:

Un capacitor de placas paralelas con aire como dieléctrico, se carga a una tensión V_0 y se desconecta de la fuente. A continuación se disminuye la distancia entre las placas a la mitad del valor original.

1) Explique las variaciones que ocurrirán en:

- a) La carga acumulada.
- b) La tensión entre las placas.
- c) La energía almacenada en el capacitor.
- d) El trabajo entregado (o recibido) al acercar las placas.

2) Ídem si no se desconecta la fuente.

4. CARGA Y DESCARGA DE CAPACITORES.

Los procesos de carga y descarga de los capacitores llevan cierto tiempo, durante el cual (período transiente) los parámetros del circuito varían. Es decir que el capacitor introduce una nueva variable en el análisis de los circuitos. Esta variable es el tiempo.

Sea el circuito mostrado en la Fig. 4.2:

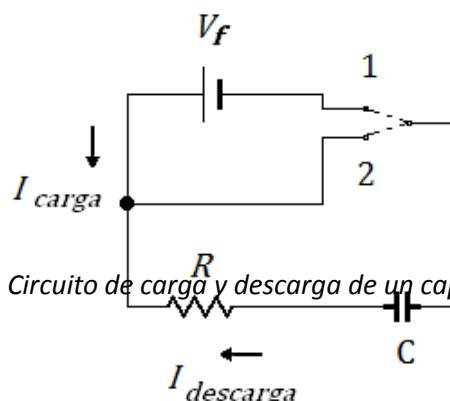


Figura 4.2. Circuito de carga y descarga de un capacitor.

Si estando el condensador **C** descargado, conectamos (a este instante lo llamamos t_0) la llave a la posición **1**, comienza a circular una corriente I_0 , que podemos calcular usando la ley de Ohm y la ley de mallas de Kirchhoff. Aplicar la ley de Ohm implica tener algún elemento al cual aplicarle el concepto de resistencia, esto es, un componente en el que se mantenga constante la relación V/I . En el circuito representado, este elemento será el resistor R . Si calculamos la intensidad sobre R , como es una malla única, tendremos la corriente en cualquier punto del circuito.

Un capacitor descargado se comporta como un cable sin resistencia. Un capacitor en equilibrio (en CC), se comporta como una llave abierta.

Si **C** está descargado, V_C (tensión entre placas) = 0, por lo que toda la tensión de la fuente caerá sobre la resistencia R , (ley de mallas) o sea:

$$V_R = V_f \rightarrow I_0 = \frac{V_f}{R} \quad (4.8)$$

Esta corriente comenzará a cargar las placas del condensador que presentará, entonces, una diferencia de potencial creciente entre ellas. A medida que esta tensión aumenta, debe disminuir V_R y, también, I_0 . El proceso continuará hasta que entre las placas del condensador, que estará cargado con q_f , se establezca una diferencia de potencial V igual a la tensión de la pila. En cualquier instante posterior a t_0 , entre las placas del condensador existirá una diferencia de potencial V_C opuesta a V :

$$V_R = V_f - V_C \rightarrow I < I_0 \quad (4.9)$$

En el equilibrio ($t \rightarrow \infty$)

$$V_C \simeq V_f \Rightarrow V_R \simeq 0 \Rightarrow I \simeq 0$$

Puede demostrarse fácilmente que se cumplen las siguientes relaciones:

$$Q = Q_f \left(1 - e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \right) \quad (4.10)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = I_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.11)$$

Donde

$$Q_f = C \times V \quad I_0 = \frac{V}{R}$$

Si estando el condensador cargado, se cambia la llave a la posición **2**, el condensador se descarga a través de **R** en un proceso análogo y opuesto al anterior. Las relaciones correspondientes son:

$$Q = Q_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.12)$$

$$I = -I_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}} \quad (4.13)$$

Donde los subíndices " 0 " aluden al estado inicial de carga del condensador, o sea que:

$$Q_0 = C \times V_0 \quad I_0 = \frac{V_0}{R}$$

Obsérvese que el producto $R \times C$ es característico de cada circuito y tiene dimensiones de tiempo, pues:

$$\Omega \times F = \frac{V}{A} \times \frac{C}{V} = \frac{C \times s}{C} = s \quad (4.14)$$

Se lo conoce como *constante de tiempo* del circuito y se lo simboliza por τ . Veremos qué significado físico puede asignársele. Lo primero que hay que notar es que el condensador se acerca asintóticamente a su estado final. Es decir que termina su proceso de carga o de

descarga, teóricamente a tiempo infinito. Pero también se observa que puede alcanzarse cualquier estado que se desee en un tiempo finito y calculable.

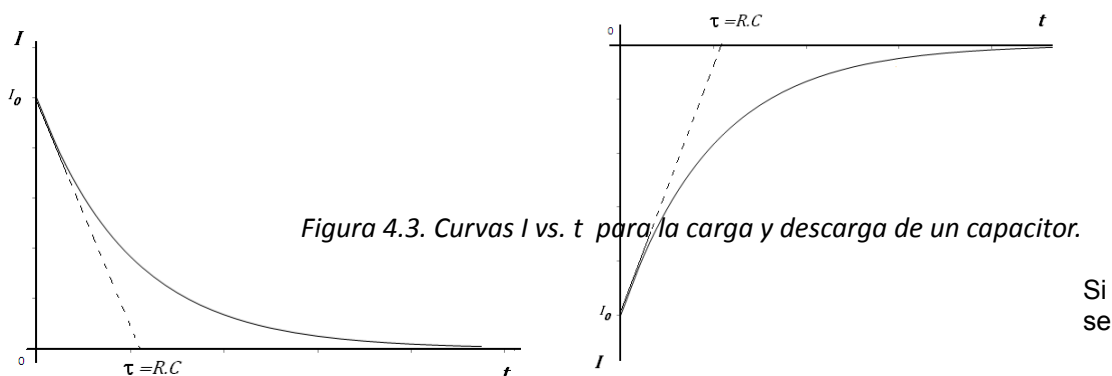


Figura 4.3. Curvas I vs. t para la carga y descarga de un capacitor.

Si
se

traza la tangente de la curva en $t=0$ en las gráficas I vs. t , que tienen la misma forma tanto para la carga como para la descarga, (salvo la inversión debida al signo contrario) se comprueba que τ es el tiempo en que se completaría uno u otro proceso si siguiese al mismo ritmo inicial.

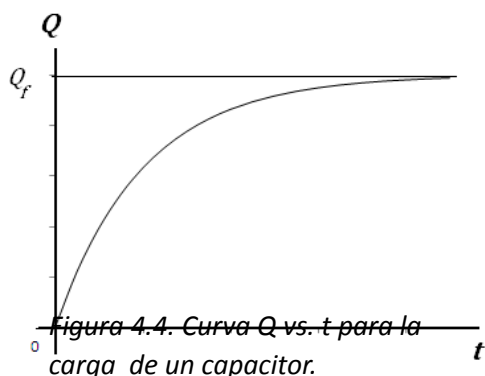


Figura 4.4. Curva Q vs. t para la carga de un capacitor.

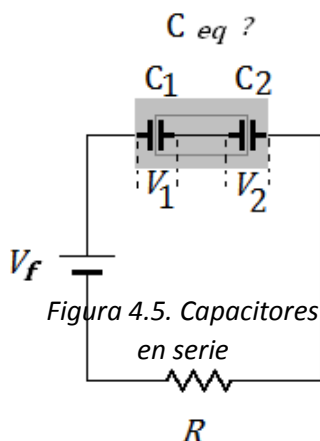
Lo mismo es evidente en la representación de q vs. t , para la carga, que se muestra en la Fig. 4.4

Cuando $t = \tau$, el condensador se ha cargado o descargado, según el caso, una fracción $1/e$ del valor máximo y cuando $t = 4\tau$, como $e^{-4} = 0,018$, más del 98% del proceso ya ha ocurrido. Para muchos fines prácticos puede considerarse que se ha alcanzado el equilibrio.

Ejercicio 4.2:

Diseñar un circuito RC tal que el capacitor acumule (partiendo de $Q_0=0$) una carga de 10mC en 30s y posteriormente pierda el 90% de su carga en 10 s, al descargarse a través de la resistencia.

5. CONEXIÓN EN SERIE Y PARALELO.



Sea el siguiente circuito:

¿Cuál sería la capacidad de un único dispositivo que reemplazara a C_1 y C_2 ?

Puesto que definimos

$$C = \frac{Q}{V}$$

Y observando que la carga total obtenida es la de la placa positiva de C_1 , puesto que en el sector marcado con la línea gris oscuro, no pueden haber entrado o salido cargas, ya que está aislada, resulta:

$$C_{eq} = \frac{Q}{V_1 + V_2} \rightarrow \frac{1}{C_{eq}} = \frac{V_1}{Q} + \frac{V_2}{Q} \quad (4.15)$$

O lo que es lo mismo,

Agrupación en serie

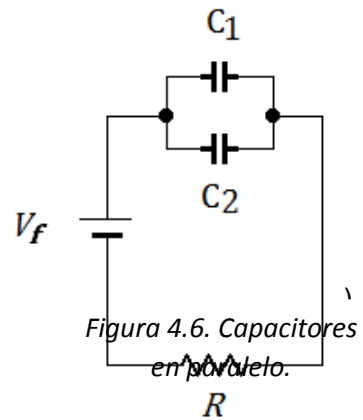
$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (4.16)$$

Resultado que, desde el punto de vista físico, resulta cualitativamente aceptable (la capacidad total disminuye) ya que al conectar capacitores en serie, lo que hacemos es aumentar la separación entre las cargas opuestas, manteniendo la superficie de placas igual.

Es fácil demostrar que para la conexión en paralelo (Fig 4.6):

Agrupación en paralelo

$$C_{eq} = \sum_i C_i$$



Físicamente equivalente a aumentar la superficie de las placas, manteniendo constante su separación.

Ejercicio 4.3:

Un condensador de $2\mu\text{F}$ y otro de $4\mu\text{F}$, se conectan en serie con una batería de 18 V.

- Determinar la carga depositada sobre los condensadores, la diferencia de potencial a través de cada uno de ellos y la energía almacenada.
- Idem si se conectan en paralelo.

6. APLICACIONES

Un capacitor conectado a un circuito CC, presenta un estado transitorio o transiente que se acerca asintóticamente a su estado estacionario o de equilibrio, donde deja de circular corriente. Un capacitor hace de la rama a la que está conectado, un circuito abierto. En cambio, en un circuito CA el capacitor permite la circulación de corriente para cargarse y para descargarse, aunque las cargas nunca atraviesen el dieléctrico. Cuando la constante de tiempo del circuito es del orden del período de la pulsación de la corriente, se producen interacciones interesantes sobre las que volveremos más adelante. Podemos distinguir los siguientes tipos de uso:

- Para almacenamiento de energía. (Especialmente los supercapacitores, ver sección 6.3)
- Como filtros de determinadas frecuencias.
- Como filtros para eliminar “rizado” en los rectificadores de CA.
- Para disparar pulsos de gran corriente. (flash fotográfico, disparadores de explosivos nucleares).
- En circuitos sintonizadores, seleccionando la frecuencia de resonancia.
- Como supresores de transitorios en circuitos inductivos. (Ver más adelante Inducción electromagnética).
- En temporizadores, alarmas, atenuadores (*dimmers*), etc.
- Conmutadores táctiles, basados en sensores capacitivos.
- Pantallas táctiles: La tecnología pro-cap (de capacidad proyectada) es la más ampliamente usada, sobre todo en telefonía móvil. Al tocar la pantalla se produce una

redistribución de las cargas y un cambio en la capacidad eléctrica, que permite identificar en qué posición se efectuó el contacto.

- Teclados capacitivos: El movimiento de la tecla cambia la distancia entre dos placas cargadas, que constituyen un capacitor con aire como dieléctrico, provocando un cambio en la capacidad que se transforma en una señal.

6.1 Memorias Dram.

Los estados cargado/descargado pueden funcionar como estados digitales. Las memorias DRAM (RAM dinámicas) son matrices con millones de capacitores integrados en un chip, cada uno controlado por un transistor, que trabaja como interruptor. La escritura consiste en dar a cada capacitor el estado cargado/descargado, asimilable a un bit 1/0 y la lectura en sensar el estado en que se encuentran.

La lectura es destructiva, aunque de todas maneras, el capacitor pierde su carga en pocos milisegundos, requiriendo de un circuito adicional que está leyendo el contenido de la memoria y actualizándolo antes de que se pierda. De aquí viene el término “Dinámica”. Aunque las DRAM son más lentas y requieren más circuitería que las SRAM, son más económicas; su capacidad de almacenamiento es mucho mayor y constituyen mayoritariamente la memoria de trabajo de los sistemas, relegando a las SRAM, basadas sólo en transistores, a las memorias caché, donde la velocidad es más importante. ¿Cómo se logra integrar millones de capacitores en un chip de unos pocos cm^2 ? Ese “milagro” forma parte de las tecnologías de la microelectrónica de estado sólido, que estudiaremos en su momento.

Por otro lado, en los circuitos puede aparecer un fenómeno capacitivo no buscado. Por ejemplo, la velocidad de conmutación de una puerta lógica está ligada a la capacidad parásita presente en las uniones n-p de los semiconductores, ya que esa unión, de hecho, se comporta como un capacitor al que hay que cargar y descargar para cambiar su estado y ese proceso, como vimos, insume cierto tiempo.

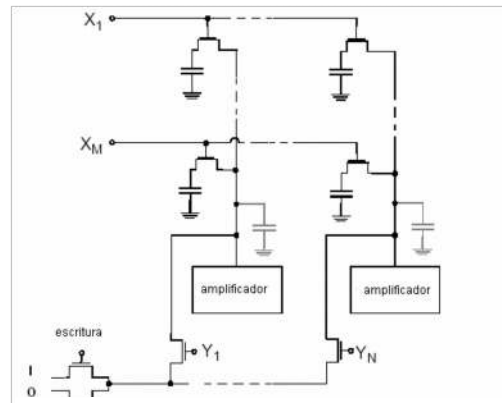


Figura 4.7 Detalle de arquitectura de celdas DRAM

7. TIPOS DE CAPACITORES.

7.1 Capacitores de capacidad variable.

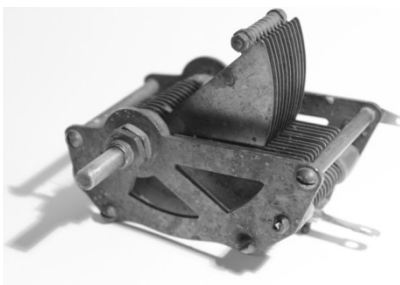


Figura 4.7. Capacitor variable rotativo. Wikimedia commons.

En determinadas aplicaciones se requiere poder cambiar la capacidad del dispositivo. Durante muchos años se han utilizado capacitores variables en los receptores de radio para efectuar la sintonía, basados en una estructura mecánica de geometría variable, donde la rotación de un eje, cambia el área efectiva de las placas. En la actualidad han sido desplazados, en gran medida, por dispositivos de estado sólido (varactores) que consisten en diodos. En ellos existe una doble capa eléctrica y la separación entre las cargas, equivalente a la distancia

entre placas, es función de la tensión aplicada.

7.2 Capacitores de capacidad fija.

En la tabla 4.3 se describen las características de algunos de los más comunes.

Tipo de	Principio de	Rango de	Ventajas/desventajas
---------	--------------	----------	----------------------

capacitor	funcionamiento	capacidades / tensiones	
Cerámico	El nombre alude al dieléctrico empleado.	100pF- 10nF/ 25V - 3kV	Pequeño tamaño, no polarizados/ mediocre tolerancia.
Película: Policarbonato, poliesti-reno, poli-éster, teflon y otros	El dieléctrico es un film de polímero.	10nF – 47µF 25 - 2000V	No polarizados; resistente a la humedad; reducido tamaño/ pérdidas (excepto los de poliéster).
Electrolítico de aluminio	El dieléctrico es óxido de aluminio de muy bajo espesor, depositado por vía electroquímica. Una placa es de aluminio, la otra es un electrolito viscoso.	1µF - 10mF 5 - 450V	Polarizados o no; gran rendimiento volumétrico/ malas tolerancias y pérdidas; vida útil desde 1000 hs (se deterioran aunque no se usen).
Electrolítico de tantalio	Similares a los de aluminio.	47nF - 1.2mF 3 - 450V	Polarizados o no; gran rendimiento volumétrico; menor corriente de fuga/ más caro y menor rango de valores que los electrolíticos de aluminio.

Tabla 4.3. Características de distintos tipos de capacitores

7.3 Supercondensadores (ultracapacitores). EDLC (Electric Double Layer Capacitor).

Vimos que un capacitor al descargarse entrega energía, igual que lo hace una batería o cualquier fuente de CC. ¿Cuáles son las diferencias de “performance” entre unos y otros? Desde el punto de vista de la capacidad de almacenar energía, los capacitores no pueden competir. Cualquier dispositivo electroquímico presenta una densidad de energía mucho mayor. Sin embargo, la situación se invierte si se consideran la potencia (energía/tiempo) y el tiempo de carga/descarga. Tradicionalmente los capacitores se utilizaron para disparar procesos que requieren alta potencia, como un flash fotográfico o el detonador de un explosivo nuclear.

Los supercapacitores buscan cerrar la brecha entre ambos tipos de dispositivos, con capacidades de hasta 12000 F, colocándose en el rango de densidad de energía del

10% de las baterías recargables, pero superándolas entre 10 y 100 veces en potencia. Al mismo tiempo requieren tiempos de carga mucho más breves y presentan mayor tolerancia a ciclos de carga/descarga numerosos, obteniendo mayor vida útil.

El principio de funcionamiento se basa, por un lado, en propiedades conocidas de hace mucho tiempo como las de la doble capa eléctrica de Helmholtz, descrita ya alrededor de 1853. Según este eminente físico y fisiólogo, cuando un conductor por electrones se pone en contacto con un conductor iónico, sólido o líquido, aparece entre las dos fases una frontera constituida por una doble capa de iones de cargas opuestas, separadas entre sí por distancias moleculares. La carga acumulada en la doble capa origina un campo eléctrico estático tal como el de un capacitor convencional, pero las pequeñísimas distancias involucradas elevan en forma extraordinaria la capacidad del dispositivo.

Pero, por otro lado, se suma a esto un nuevo fenómeno bautizado como “pseudocapacitancia” que genera nuevas cargas acumuladas por un proceso electroquímico. Según el diseño, la pseudocapacitancia puede aportar hasta 100 veces más capacidad que la doble capa.

Un nuevo paso adelante en esta tecnología lo constituyen los capacitores híbridos de ion-litio, que combina el mecanismo de funcionamiento de la batería de ion-litio con el cátodo de un capacitor EDLC, alcanzándose densidades de energía de aproximadamente 20 Wh/kg, unas cuatro veces más alta que los supercapacitores EDLC y cinco veces menores que una batería ion-litio. La densidad de potencia, por otra parte es similar a la de los supercapacitores.

Los supercapacitores encuentran su aplicación óptima en sistemas que requieren muchos y veloces ciclos de carga y descarga, más que en el almacenamiento prolongado y compacto de energía eléctrica. Típicamente en automóviles, buses, trenes, ascensores, grúas, donde, gracias a la velocidad de la carga, se puede recuperar la energía disipada por los sistemas de freno. También en almacenamiento de corto término y en prestaciones donde se requiere alta potencia instantánea.

Una mención especial merecen las aplicaciones ligadas a los sistemas de cómputo e información:

- Supercapacitores de hasta 1,5 F se usan como respaldo de energía para permitir la continuidad de funciones críticas en dispositivos de baja potencia, como RAM, SRAM, PLC, etc.
- En combinación con sistemas UPS, basados en baterías, los supercapacitores proveen energía durante las interrupciones breves, aumentando la vida útil de las baterías, disminuyendo los costos por ciclo y permitiendo el uso de baterías de menor tamaño.

En la Tabla 4.4. se presentan en forma comparada las performances de diferentes sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.

Parámetro	Electro-lítico(Al)	Supercapacitores			Baterías de ion-litio
		EDLC para backup de memorias	EDLC para aplicaciones de potencia	Capacitores híbridos (de ion-litio)	
Densidad de energía (W-h/kg)	0.01 - 0.3	1.5 - 3.9	4 - 9	10 - 15	100 - 265
Densidad de potencia (kW/kg)	> 100	2 - 10	3 - 10	3 - 14	0,3 - 1.5
Autodescarga	Alta (días)	Media (semanas)	Media (semanas)	Baja (meses)	Baja (meses)
Eficiencia (%)	99	95	95	90	90

RESUMEN

Los capacitores (o condensadores) son dispositivos utilizados para almacenar energía en la forma de carga almacenada. La Tabla 4.4. Performance comparada de capacitores y baterías de ion-litio. (A partir de datos de <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>)

Los valores usuales de densidad de energía y potencia, a diferencia de las baterías de ion-litio, son muy bajos. La densidad de potencia acumulada y tensión alcanzada entre los terminales del dispositivo, lo que significa que, a mayor capacidad, se puede almacenar la misma carga con menor diferencia de potencial.

La capacidad de un capacitor de placas es directamente proporcional a la superficie de éstas e inversamente proporcional a la distancia entre ellas, que es el espesor del material utilizado como dieléctrico. La constante de proporcionalidad es una propiedad del dieléctrico llamada *capacidad específica de inducción* ϵ , que puede expresarse a su vez, como el producto de una constante universal, *permitividad del vacío* ϵ_0 y la *permitividad relativa*, ϵ_r característica de cada material.

La energía almacenada puede calcularse como el semiproducto de carga y tensión entre placas.

El capacitor introduce la variable *tiempo* en el análisis de circuitos. Los procesos de carga y descarga siguen una ley exponencial con el tiempo y, teóricamente no se completan jamás, aunque es posible llegar a cualquier estado prefijado en un tiempo finito. En una malla elemental, conteniendo un capacitor y una resistencia (circuito RC), el producto de ambos valores expresa el tiempo característico τ . En un tiempo igual a 4τ , se completa más del 98% del proceso y para muchos fines prácticos puede considerarse que se ha alcanzado el equilibrio.

En circuitos de CC, un transistor descargado se comporta como un conductor ideal y en equilibrio como una llave abierta.

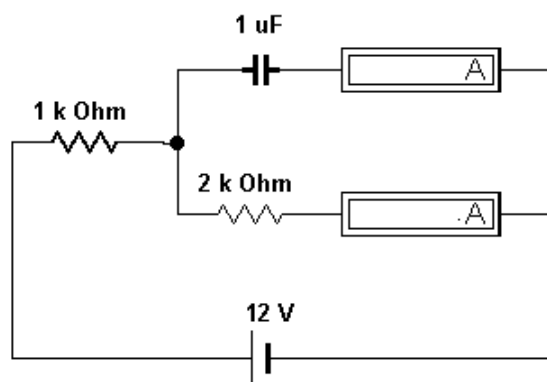
Igual que los resistores, los capacitores pueden conectarse entre sí de diferentes maneras. Si se conectan en serie, la capacidad equivalente disminuye, ya que físicamente se alejan las placas. Si lo hacen en paralelo, aumenta (físicamente se aumenta el área de las placas).

Entre las numerosas aplicaciones de los capacitores, se destaca en los sistemas informáticos, su utilización como portadores de información ya que los estados cargado/descargado pueden funcionar como estados digitales. Las memorias DRAM (RAM dinámicas) son matrices con millones de capacitores integrados en un chip, cada uno controlado por un transistor, que trabaja como interruptor. La escritura consiste en dar a cada capacitor el estado cargado/descargado, asimilable a un bit 1/0 y la lectura, en sensar el estado en que se encuentran.

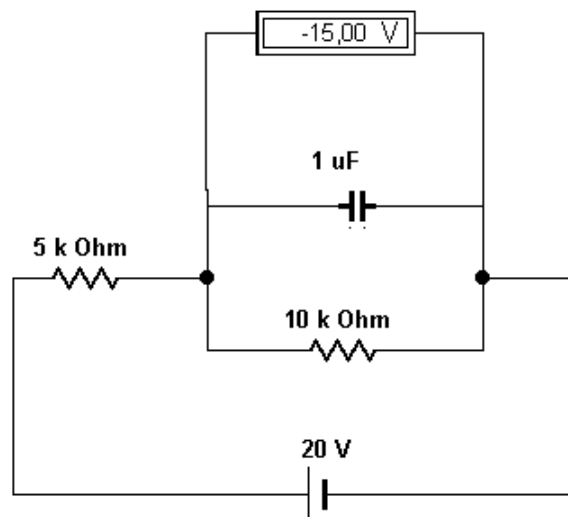
Los ultra o súper capacitores de doble capa (EDLC), abren una nueva perspectiva en las posibilidades de almacenar energía eléctrica. Encuentran su aplicación óptima en sistemas que requieren muchos y veloces ciclos de carga y descarga, donde compiten con ventaja con los tradicionales sistemas de baterías recargables.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

- 1) Diseñar un condensador plano, operando con el aire como dieléctrico, con una capacidad de 1F. Disponiendo de papel tisú de 0,01 mm como dieléctrico, ¿qué capacidad le parece que puede alcanzar, con dimensiones razonables?
- 2) En el circuito siguiente, para $t=0$ el capacitor se encuentra descargado. Determinar las lecturas iniciales y finales ($t = \infty$) de los instrumentos. Dibuje las curvas I vs. t correspondientes.

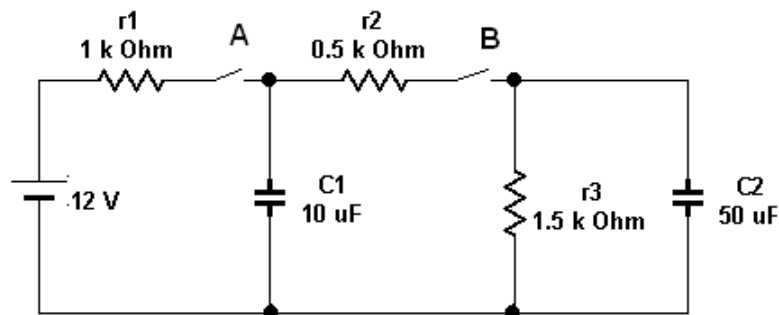


- 3) En el siguiente circuito se cierra la llave en $t=0$, siendo la tensión sobre el capacitor la que muestra el voltímetro.

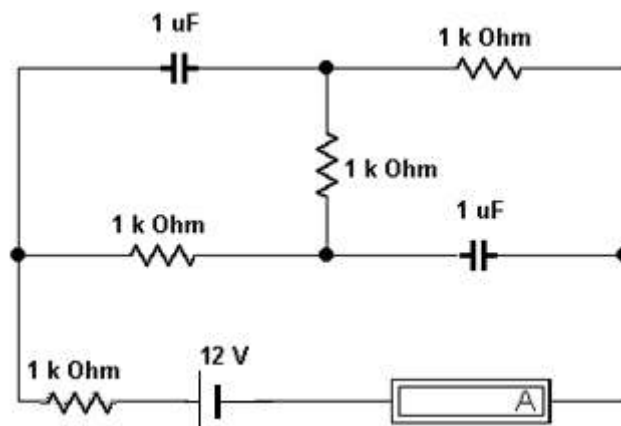


- Indicar:
- a) El valor y el sentido de circulación de todas las corrientes en $t=0$
 - b) Ídem en el equilibrio.
 - c) Describir qué sucedería si, una vez en el equilibrio, se invierte la polaridad de la batería.

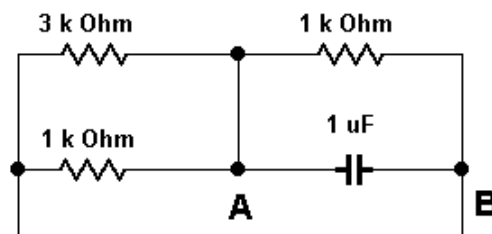
- 4) En el circuito siguiente, inicialmente, los capacitores están descargados y ambas llaves abiertas. En $t=0$ se cierran ambas llaves. Calcular:
- La corriente inicial por la batería.
 - La corriente inicial por $C1$ y $C2$.
 - La corriente de equilibrio de la batería.
 - Las tensiones de equilibrio de $C1$ y $C2$.
 - Una vez alcanzado el equilibrio, vuelve a abrirse la llave B. Escribir la ecuación que representa la corriente por $r3$ en función del tiempo.
 - La energía acumulada en cada capacitor al alcanzarse el equilibrio. ¿Será esta energía igual a la entregada por la fuente?



- 5) En el circuito siguiente, la condición inicial es capacitores descargados. Calcule
- Las corrientes inicial y final, a través de la batería.
 - Idem a través de los capacitores.

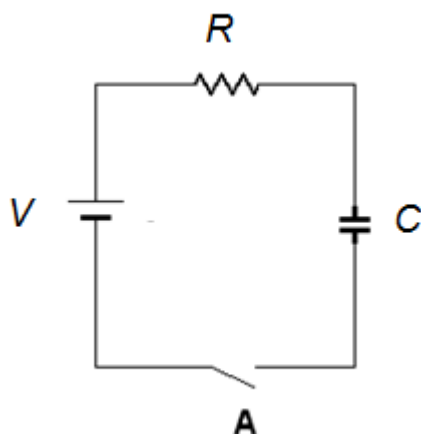


- 6) En el figura, en un instante determinado, la tensión entre los puntos A y B es de 8 V, siendo el potencial de A más alto que el de B.



- Determine el valor de las intensidades de corriente en cada una de las ramas del circuito en ese mismo instante.
- Idem cuando el capacitor alcanza el equilibrio.
- Repita el ejercicio si las condiciones iniciales son que la diferencia de potencial entre A y B tiene el mismo valor absoluto pero polaridad opuesta.
- Dibuje, para ambos casos, el gráfico I vs. t para la resistencia en paralelo con el capacitor.

7) En el circuito RC elemental representado en el dibujo:



$$C = 100 \mu\text{F}$$

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$V = 20 \text{ V}$$

$$\text{Para } t = 0; Q_c = 0$$

En $t = 0$ se cierra la llave A.

- ¿Cuál es la carga máxima que alcanza el capacitor?
- ¿La energía acumulada?
- ¿La energía entregada por la batería durante la carga? ¿Por qué es diferente de la calculada en b)?
- Complete la siguiente tabla:

Tiempo (s)	Intensidad de corriente (mA)
50×10^{-3}	
0,5	
1	
5	

e)

8) Considere los siguientes dispositivos:

- una batería de 9V, 250mAh. ¿Cuál sería su capacidad eléctrica C y la carga eléctrica total y la energía que puede suministrar?

- b) el capacitor electrolítico comercial de mayor capacidad ($C = 100.000 \mu\text{F}$; Tensión máxima = 10V) ¿Cuál es la máxima carga que puede almacenar y la energía máxima almacenada?

Expresa los resultados de carga eléctrica en Coulomb y en mAh y los de energía en J y Wh.

RESPUESTAS Y COMENTARIOS

Ejercicio 4.1:

1.

- a) No varía
- b) Disminuye
- c) Disminuye
- d) Se recibe trabajo

2.

- a) Disminuye
- b) No varía
- c) Disminuye
- d) Se recibe trabajo

Puede visitarse:

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/plano/plano.htm
para profundizar.

Ejercicio 4.3:

a) $Q = 24 \mu\text{C}$; $V_{C1} = 12\text{V}$, $V_{C2} = 6\text{V}$; $L = \frac{1}{2} Q \cdot V = 216 \mu\text{J}$.

b) $Q_1 = 36 \mu\text{C}$, $Q_2 = 72 \mu\text{C}$; $V = 18\text{V}$; $L = \frac{1}{2} C_{\text{eq}} \cdot V^2 = 972 \mu\text{J}$

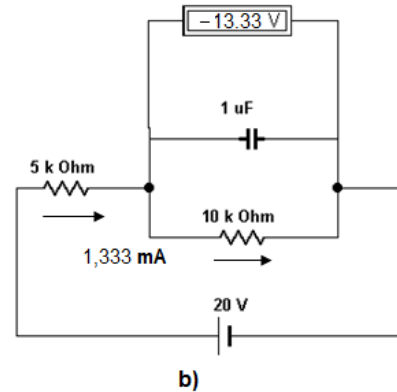
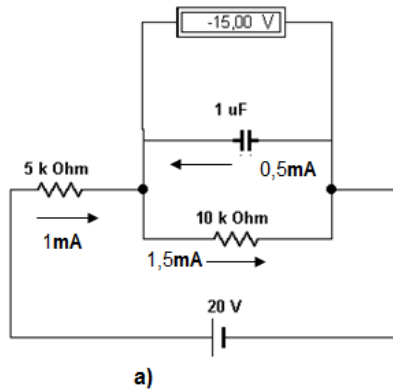
PREGUNTAS Y PROBLEMAS

2)

$I_{C0} = 12\text{mA}$; $I_{C\infty} = 0$

$I_{R0} = 0$; $I_{R\infty} = 4\text{mA}$

3)



(El capacitor está más cargado que lo que corresponde a su equilibrio, así que debe descargarse)

- c) El capacitor se descargará y volverá a cargarse a la tensión de equilibrio (13,33V) con la polaridad opuesta.

4)

- a) La corriente inicial por la batería. **12mA**
 b) La corriente inicial por C1 y C2. $I_{C1}=12\text{mA}$; $I_{C2} = 0$
 c) La corriente de equilibrio de la batería. $I_f = 4\text{mA}$.
 d) Las tensiones de equilibrio de C1 y C2. $V_{C1} = 8\text{V}$; $V_{C2} = 6\text{V}$
 e) La corriente por r3 en función del tiempo.

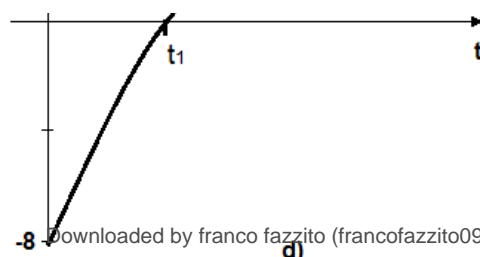
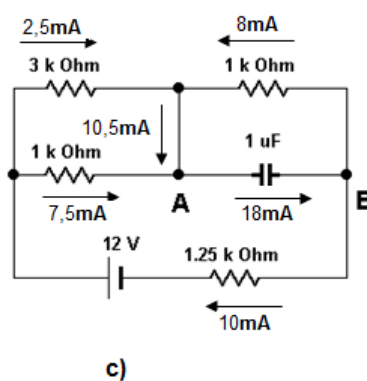
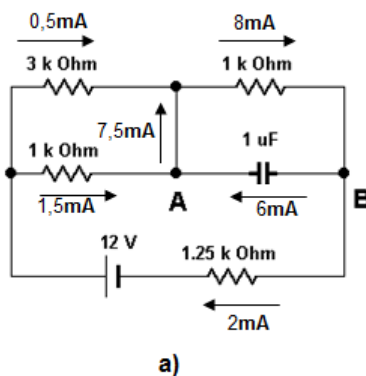
$$I = 6\text{V} \cdot e^{-A \cdot t}; \text{ donde } A = \frac{1}{0,075\text{s}}$$

- f) $L_{C1} = 320\mu\text{J}$; $L_{C2} = 900\mu\text{J}$. No, parte de la energía se ha disipado en las resistencias.

5)

- a) $I_{f0} = 9\text{mA}$; $I_{f\infty} = 3\text{mA}$
 b) $I_{C0} = 6\text{mA}$; $I_{C\infty} = 0$

6)



Obsérvese que el estado final es el mismo en ambos casos y que en el segundo, la corriente cambia de sentido en t_1 .

7)

- a) $Q_{max.} = 2\text{mC}$
- b) $L = 20\text{mJ}$
- c) *La energía entregada por la batería puede calcularse como el producto de $I \times V$. V es constante durante el proceso, pero I varía con el tiempo. Así que hay que resolver la integral:*

$$L = V \int_0^{\infty} I \cdot dt = \frac{V}{R} \cdot V \int_0^{\infty} e^{\frac{-t}{R \cdot C}}$$

resultando

$$L = C \cdot V^2$$

Que es el doble de la acumulada por el capacitor. La otra mitad se disipa como calor en la resistencia.

d)

Tiempo (s)	Intensidad de corriente (mA)
50×10^{-3}	1,99
0,5	1,21
1	0,74
5	0,01

8) Considere los siguientes dispositivos:

a) *mAh es una unidad de carga eléctrica, que expresada en C:*

$$Q = 0,25 \text{ A} \times 3600 \text{ s} = 900 \text{ C}$$

Entonces,

$$C = \frac{900 \text{ C}}{9 \text{ V}} = 100 \text{ F}$$

Suponiendo que la batería entrega toda su carga a la misma tensión (9 V)

$$L = Q \times V = 8100 \text{ J}$$

$$L = 8100 \text{ W} \cdot \text{s} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 2,25 \text{ Wh}$$

b) $Q = 0,1 \text{ F} \times 10 \text{ V} = 1 \text{ C} = 0,28 \text{ mAh} =$

$$L = \frac{C \cdot V^2}{2} = \frac{0,1 \text{ F} \times 100 \text{ V}^2}{2} = 50 \text{ J} = 0,014 \text{ Wh}$$

Si ponemos todo en una tabla:

	Batería	Capacitor
<i>Carga eléctrica (C)</i>	900	1
<i>Carga eléctrica (mAh)</i>	250	0,28
<i>Capacidad (F)</i>	100	0,1
<i>Energía acumulada (J)</i>	8100	50
<i>Energía acumulada (Wh)</i>	2,25	0,014

UNIDAD V

EL CAMPO MAGNÉTICO

1. INTRODUCCIÓN

Aunque el magnetismo fue conocido por el hombre a través de los imanes naturales y son ellos la referencia más familiar que tenemos hacia este fenómeno, todas las variedades de imanes son una consecuencia de la interacción entre unas fuerzas distintas de las eléctricas, (aunque, como veremos, estrechamente relacionadas con las cargas) y una clase muy especial de materiales.

La fuerza magnética en sí, existe independientemente de los imanes y en esta unidad, nos ocuparemos de ella en sí misma, sin entrar a considerar la mencionada interacción. En la unidad siguiente veremos los distintos tipos de materiales y sus aplicaciones.

La relación entre la electricidad y el magnetismo, sólo empezó a aclararse en la segunda década del s.XIX, con los experimentos de Oersted, Ampère, Faraday y otros. Ampère propuso un modelo teórico del magnetismo todavía en vigencia: la fuente fundamental del magnetismo no es un polo magnético, sino una corriente eléctrica. Propuso que el magnetismo de un imán permanente es debido a micro espiras de corriente dentro del material. Hoy se supone que estas espiras están asociadas al movimiento de los electrones dentro de los átomos (desarrollaremos algo más este tema en la Unidad VI). En 1860 Maxwell elaboró una teoría completa del electromagnetismo, demostrando que un campo eléctrico variable origina uno magnético y viceversa.

En este capítulo debemos utilizar fórmulas con operaciones entre vectores. Los vectores serán representados con letras en negrita **B** y los escalares (incluyendo los módulos de los vectores), en cursiva *B*.

2. FUERZA SOBRE UNA CARGA EN MOVIMIENTO

Si en un punto existe un campo magnético **B**, -situación que puede comprobarse en forma independiente por la acción sobre una aguja magnética-, una carga *q* en movimiento, sufrirá en ese punto, la acción de una fuerza **F_B**, que se suma a la descrita por la ley de Coulomb, y que cumple:

- 1) Es proporcional a la carga *q* y la dirección es opuesta si el signo de la carga es opuesto.
- 2) Es proporcional a la componente de la velocidad **v** en la dirección perpendicular al campo **B**.
- 3) Es perpendicular tanto al campo **B** como a la velocidad **v**.

Si expresamos estos resultados experimentales mediante una expresión matemática:

$$F_B = q \cdot v \times B \quad (5.1)$$

O, ya que el símbolo "X", está indicando que se trata del *producto vectorial* entre v y B :

$$F_B = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (5.2)$$

Donde α es el ángulo menor que forman v y B . (Fig. 5.1). De esta manera, la fuerza total sobre una carga en estas condiciones, será:

Ley de Lorentz

$$F = F_E + F_B = q \cdot (E + v \times B) \quad (5.3)$$

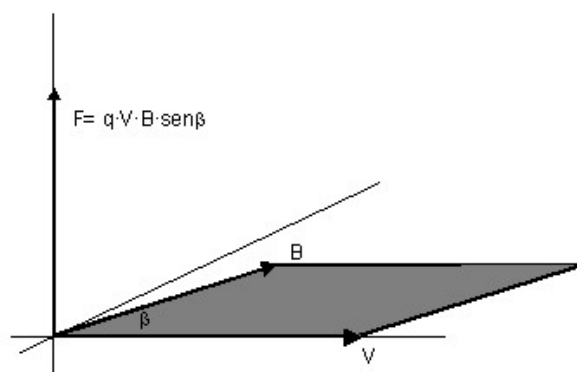
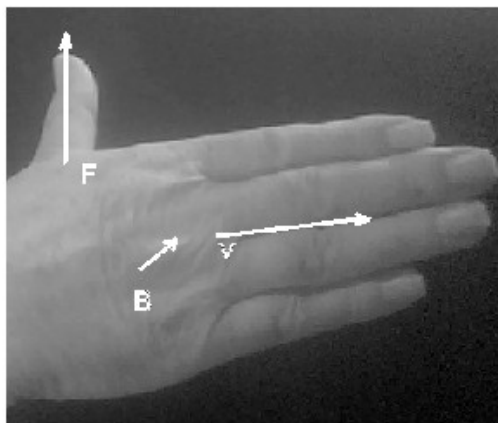
Del primer término de (5.3) ya nos hemos ocupado en electrostática, ahora nos ocuparemos del segundo. La ec. (5.2) puede considerarse la definición de B como intensidad de campo magnético, ya que la podemos ver como la fuerza que actúa sobre la carga unitaria, moviéndose a velocidad unitaria, perpendicularmente al campo.

$$B = \frac{F}{q \cdot v \cdot \sin \alpha} \quad (5.4)$$

Ejercicio 5.1:

¿Qué dirección relativa entre v y B , dará como resultado una mayor fuerza de Lorentz?
¿Habrá alguna dirección para la cual, la interacción resulte nula? Justifique.

Figura 5.1. En el producto vectorial, el vector resultado es perpendicular al plano que determinan los factores, su dirección viene dada por la regla de la mano derecha y su módulo es proporcional al paralelogramo sombreado.



Regla de la mano derecha: Si se coloca esta mano perpendicular a B y de tal manera que penetre por el dorso y con los dedos extendidos se señala el sentido del movimiento de la carga positiva, el pulgar erguido señala el sentido de la fuerza.

En el Sistema Internacional, la unidad de B es el Tesla (T) y corresponde al campo magnético de intensidad tal que una carga de 1C, moviéndose perpendicularmente con una velocidad de 1 m/s, recibe una fuerza de 1N. Un Tesla es una unidad bastante grande. El campo magnético terrestre está en el orden de $10^{-4}T$, un imán permanente poderoso, produce en sus inmediaciones un campo magnético de algunas décimas, mientras que un electroimán para aplicaciones especiales puede alcanzar decenas de Tesla.

Es de uso común una unidad histórica, llamada Gauss (G), 10000 veces más pequeña:

$$1G = 10^{-4}T$$

En

La interacción magnética básica es la fuerza que existe entre dos cargas eléctricas en movimiento relativo. Esta fuerza se suma a la electrostática. Como en las otras interacciones a distancia, se supone que la fuerza se transmite a través de otro agente: el campo magnético.

forma similar a lo que se hace con el campo eléctrico, B puede representarse también mediante líneas. El campo magnético será tangente en todo punto a estas líneas y su densidad será proporcional a B .

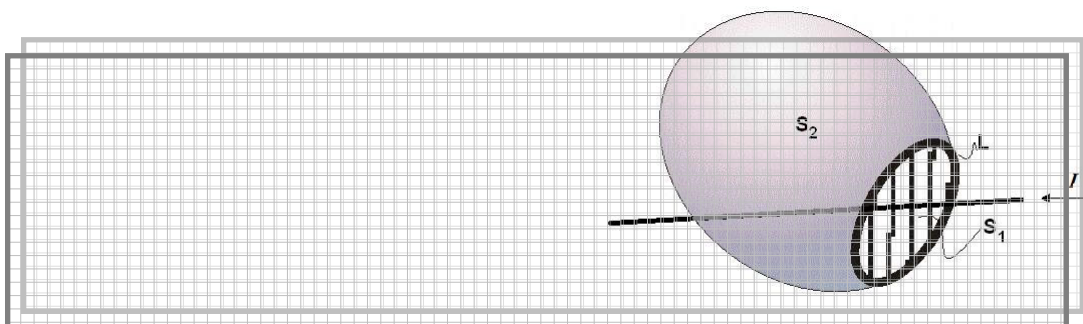
Hay, sin embargo, dos diferencias muy importantes entre uno y otro caso.

- 1) La fuerza que actúa sobre una carga móvil no tiene la dirección de \mathbf{B} , sino que es perpendicular al mismo y a la dirección de desplazamiento, tal como vimos. Una consecuencia inmediata de esto es que la *fuerza magnética no realiza trabajo sobre la carga*.
- 2) Las líneas de campo, a diferencia de las del campo eléctrico, forman circuitos cerrados. No hay puntos en el espacio donde las líneas comiencen o terminen.

Se comprende que un conductor que transporta corriente, (ya que llamamos así a las cargas en movimiento) también sufrirá la acción de un campo magnético. Para un conductor de longitud d en un campo magnético de intensidad uniforme \mathbf{B} , la fuerza de interacción es:

$$\mathbf{F} = I \cdot d \times \mathbf{B} \quad (5.5)$$

Lógicamente las direcciones del conductor y de la corriente coinciden y suele tomarse la del conductor como la magnitud vectorial.



Resumiendo, podemos decir que:

La interacción magnética básica es la fuerza que existe entre dos cargas eléctricas en movimiento relativo. Esta fuerza se suma a la electrostática. Como en las otras interacciones a distancia, se supone que la fuerza se transmite a través de otro agente: el campo magnético.

3. CAMPO MAGNÉTICO ALREDEDOR DE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

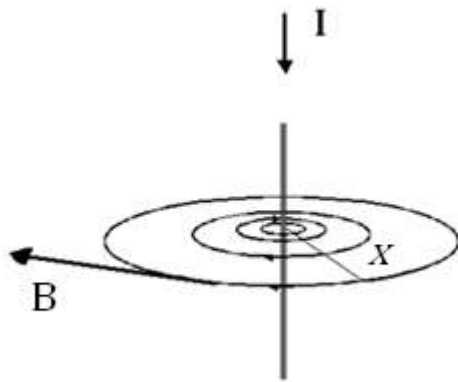
La relación cuantitativa entre una corriente eléctrica y el campo magnético asociado, fue establecida por André Marie Ampère en 1826 y está expresada por:

Ley de Ampère

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 \cdot I \quad (5.6)$$

La integral del primer miembro (conocida como circulación de \mathbf{B}) se calcula como el límite de la suma de todos los productos escalares indicados (el campo magnético \mathbf{B} por cada elemento de longitud $d\mathbf{r}$) a lo largo de un camino cerrado (L en el dibujo de la figura 5.2). Este camino define superficies posibles (que lo tienen como borde) atravesadas por la corriente I . (Fig. 5.2) La constante de proporcionalidad μ_0 que recibe el nombre de *permeabilidad del espacio libre*, es una constante = $4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$.

Figura 5.2. La corriente I a la que se refiere la ley de Ampère es la que atraviesa S_1 , S_2 o cualquier otra superficie que se apoye en L



A partir de la Ley de Ampère puede deducirse que, para un conductor rectilíneo de longitud infinita, la intensidad de campo es directamente proporcional a la intensidad de corriente e inversamente proporcional a la distancia Ec. (5.7):

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r} \quad (5.7)$$

O sea que las líneas de campo serán circunferencias concéntricas alrededor del conductor. (fig 5.3)

Y para un solenoide⁸, también de longitud infinita (o como aproximación, uno real dentro del mismo y lejos de los extremos) (fig 5.4):

Figura 5.3. Representación, mediante líneas, del campo magnético originado por una corriente eléctrica. El sentido viene determinado por la regla del tornillo.

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{D} \quad (5.8)$$

longitud.

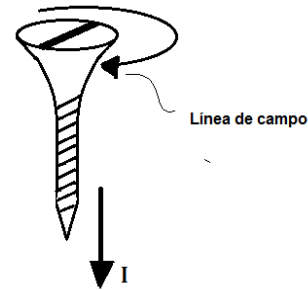
(La introducción del factor $1/2\pi$ tiene por objeto simplificar otras ecuaciones que aparecen en el tratamiento de este tema).

En el interior de un solenoide el campo magnético tiene la misma dirección para cualquier punto que se considere del conductor, por lo que cada segmento del mismo refuerza el campo y éste resulta de una intensidad apreciable. Por el contrario, en el exterior, el campo originado por un segmento cualquiera se opone al debido al segmento opuesto por el diámetro, razón por la cual el campo exterior es muy débil y casi inexistente a poca distancia del arrollamiento. Esto es útil para disponer de campos fuertes y homogéneos. Si en vez de aire, dentro del solenoide se coloca un tipo de material llamado ferromagnético, este efecto todavía se potencia más.

⁸ $1C=1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$

Se llama solenoide a una bobina cuya longitud es grande comparada con su diámetro.

Regla del tornillo: Si la dirección y sentido de una corriente coinciden con el avance de un tornillo (de rosca derecha), la dirección del campo magnético coincide con el sentido de giro del mismo.



Ejercicio 5.2:

Compruébese lo que se afirma en el párrafo anterior, aplicando la regla del tornillo a distintos segmentos de la misma espira de un solenoide y justifique el dibujo de la Figura 5.4

Si el solenoide se dispone, no en forma recta, sino cerrado sobre sí mismo (toroide), con un diámetro grande en relación al diámetro de las espiras, pueden obtenerse campos muy intensos, totalmente confinados dentro del dispositivo.

Estos campos magnéticos, creados por la circulación de corriente, son indistinguibles de los que se observan alrededor de un imán natural o artificial. Se trata del mismo fenómeno. Esto se utiliza extensamente para construir electro-imanés, dispositivos que se comportan como imanes, sólo cuando se les hace circular una corriente eléctrica.

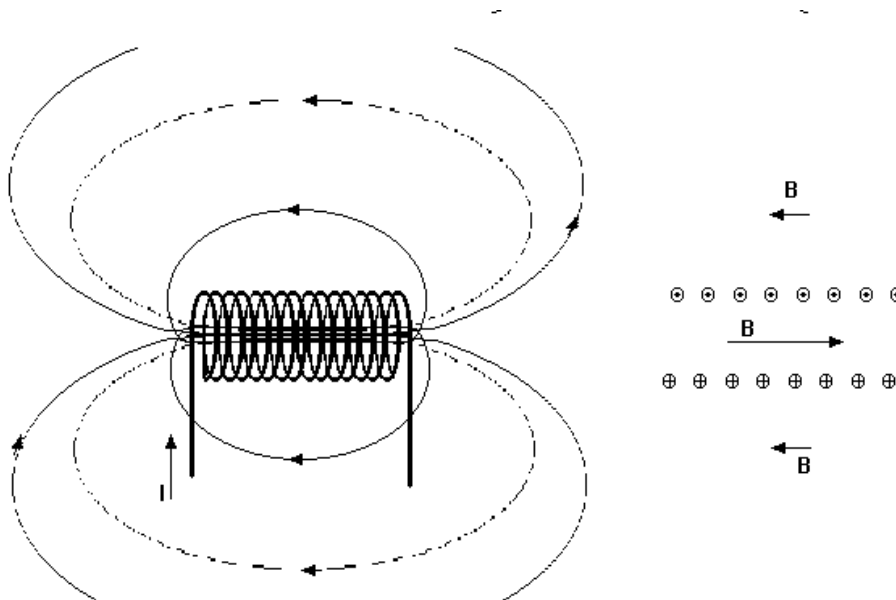


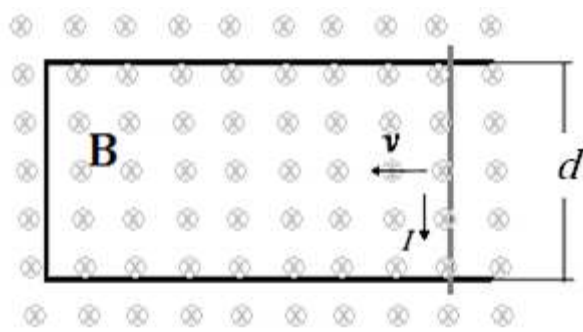
Figura 5.4. En un solenoide el campo se concentra fuertemente en el interior.

**4.
IN**

DUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

4.1 Efectos motor y generador.

Un caso particular de interacción magnética es el que ocurre entre dos



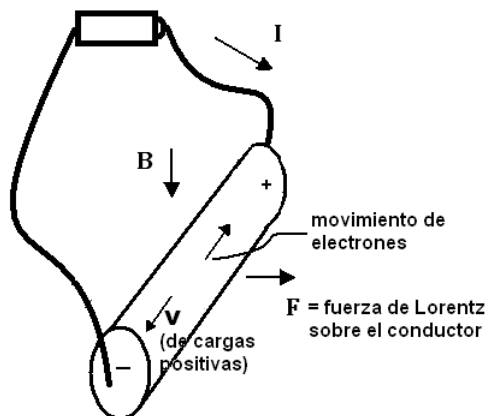
corrientes eléctricas próximas entre sí. Este es el principio de funcionamiento de los motores eléctricos, que consisten básicamente, en un conductor dentro del campo magnético, o de un imán, o bien creado por otro circuito. Al hacer

circular corriente, la fuerza de Lorentz que se ejerce sobre los electrones del conductor, lo obligan a moverse lo que se puede aprovechar para realizar trabajo mecánico.

Pero si en lugar de hacer circular los electrones, para lo cual debemos aplicar una diferencia de potencial, movemos *todo* el conductor dentro de un campo magnético... ¿No debería aparecer una fuerza sobre los electrones? Justamente es lo que ocurre, posibilitando mediante el proceso inverso al del motor, transformar energía mecánica en eléctrica. Si se desplaza al conductor de la figura 5.5 (b) en dirección perpendicular al campo magnético **B**, los electrones libres presentes, serán impulsados por la fuerza de interacción magnética, creando un campo eléctrico y una diferencia de potencial dentro del conductor.

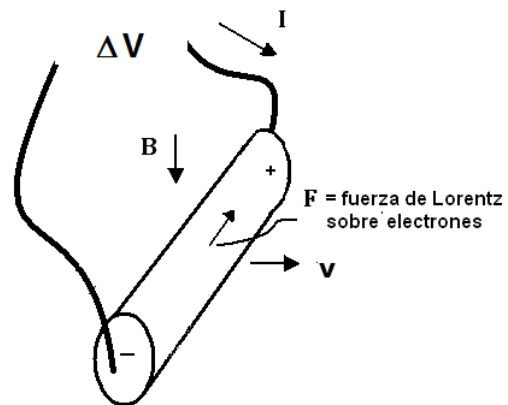
**Efecto
motor**

**Efecto
generador**



(b)

Figura 5.5 (a). El efecto motor explica la conversión de energía eléctrica de la pila en energía mecánica del conductor.



(a)

Figura 5.5 (b). El efecto generador explica la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

Como sabemos calcular la fuerza de interacción, podemos escribir, para la intensidad de campo eléctrico, dentro del conductor:

$$E = \frac{F}{q} = v \times B \quad (5.9)$$

Si tomamos, por simplicidad, las direcciones perpendiculares entre sí y recordando la relación entre el campo eléctrico y la variación del potencial (ec. (1.22)) resultará que la diferencia de potencial (en valor absoluto) establecida entre los extremos de un conductor de longitud d :

Figura 5.6. Un generador eléctrico elemental. El conductor de longitud a , se desplaza con velocidad constante v , perpendicularmente a un campo magnético B

$$\Delta V = E \cdot d = v \cdot B \cdot d \quad (5.10)$$

Ahora bien, si queremos utilizar la energía eléctrica que estamos generando, deberemos cerrar el circuito, *por fuera del campo magnético*, o bien con conductores que no se muevan respecto del mismo, para evitar que los efectos sobre tramos opuestos anulen el resultado neto. Un experimento mental sobre esta situación nos conducirá a interesantes conclusiones. Sea un dispositivo como el de la figura 5.6.

El conductor dibujado en gris oscuro se mueve en la dirección indicada con velocidad constante v . En trazos negros se indica el resto del circuito que permanece en reposo respecto del campo. En gris claro se representan "las colas de flecha" de las líneas de campo que penetran perpendicularmente al papel.

Debido al efecto generador, por el conductor circulará una corriente I , por lo que actuará sobre él una fuerza descrita por la ec. (5.5), que en las condiciones detalladas se expresará:

$$F = I \cdot d \cdot B \quad (5.11)$$

La fuerza exterior que se aplica para mantener el movimiento a velocidad constante, realizará en el tiempo dt un trabajo:

$$dL = -F \cdot dx \quad (5.12)$$

siendo dx la distancia recorrida $= v \cdot dt$, o sea:

$$dL = -I \cdot d \cdot B \cdot v \cdot dt \quad (5.13)$$

pero $i \cdot dt = dq$ entonces:

$$dL = -d \cdot B \cdot v \cdot dq \quad (5.14)$$

y

$$\frac{dL}{dq} = -B \cdot d \cdot v = \Delta V \quad (5.15)$$

Analicemos la ec (5.15): El primer miembro está expresando un *trabajo por unidad de carga* que circula por el conductor móvil, que es el que hace la fuerza exterior aplicada para mantener el movimiento a velocidad constante (o sea, es igual y opuesta a la fuerza de Lorentz sobre el conductor). En otras palabras, es el trabajo mecánico que el generador transforma en energía eléctrica, se mide en voltios y se manifiesta como una diferencia de potencial entre los extremos del alambre móvil (ΔV).

Frecuentemente recibe el nombre de *fuerza electromotriz* (aunque NO es una fuerza), y su uso se extiende a cualquier dispositivo que transforme energía de cualquier tipo en energía eléctrica. Podemos decir que la fuerza electromotriz (*fem*) es la causa de que exista y se mantenga una diferencia de potencial.

El

segundo miembro de (5.15) nos dice que esta *fem* es proporcional a la intensidad del campo magnético donde ocurre la transformación, a un factor geométrico y a la *velocidad del movimiento*. Resultado plausible, considerando que reconocimos el origen de la interacción magnética en el movimiento de las cargas eléctricas.

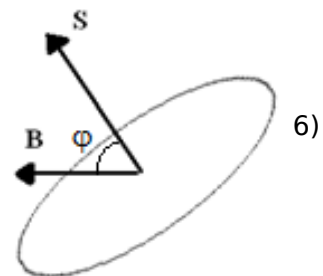
4.2 La ley de Faraday-Lenz.

Definimos una nueva magnitud "**flujo magnético**" (Φ) según la siguiente ecuación⁹:

$$\Phi = \int B \cdot dS$$

Que para el caso de una superficie plana atravesada por un campo uniforme toma la sencilla forma:

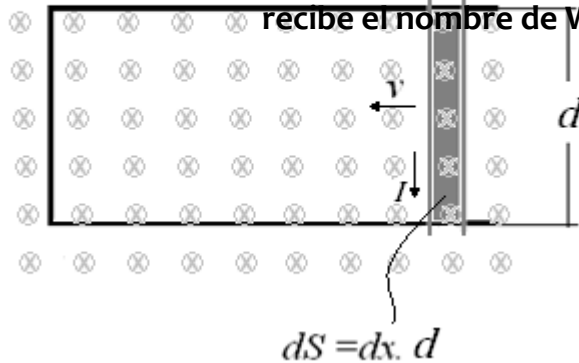
$$\Phi = B \cdot S$$



o sea, el producto escalar de los vectores que representan al campo y al sector de superficie S considerado.

⁹ $1C = 1A \cdot 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ Obsérvese que ya hemos usado el concepto de flujo y una definición análoga a esta en la Unidad I. En aquel caso se trataba del *flujo eléctrico*.

El flujo magnético es una magnitud proporcional al número de líneas que atraviesa una superficie dada, ya que B (propiedad intensiva) es proporcional a la densidad (nº de líneas por unidad de área) de las mismas. La unidad SI correspondiente, Tesla x metro cuadrado, recibe el nombre de Weber (Wb).



$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \oint B \cdot dS \cdot \cos \theta \quad (5.18)$$

Como el vector que representa a una superficie es perpendicular a la misma, el flujo será máximo cuando la superficie sea perpendicular a \mathbf{B} . La Figura 5.7 ilustra las relaciones entre estos vectores.

Figura 5.8. La Ley de Faraday establece la relación de la fem generada con la variación del flujo magnético.

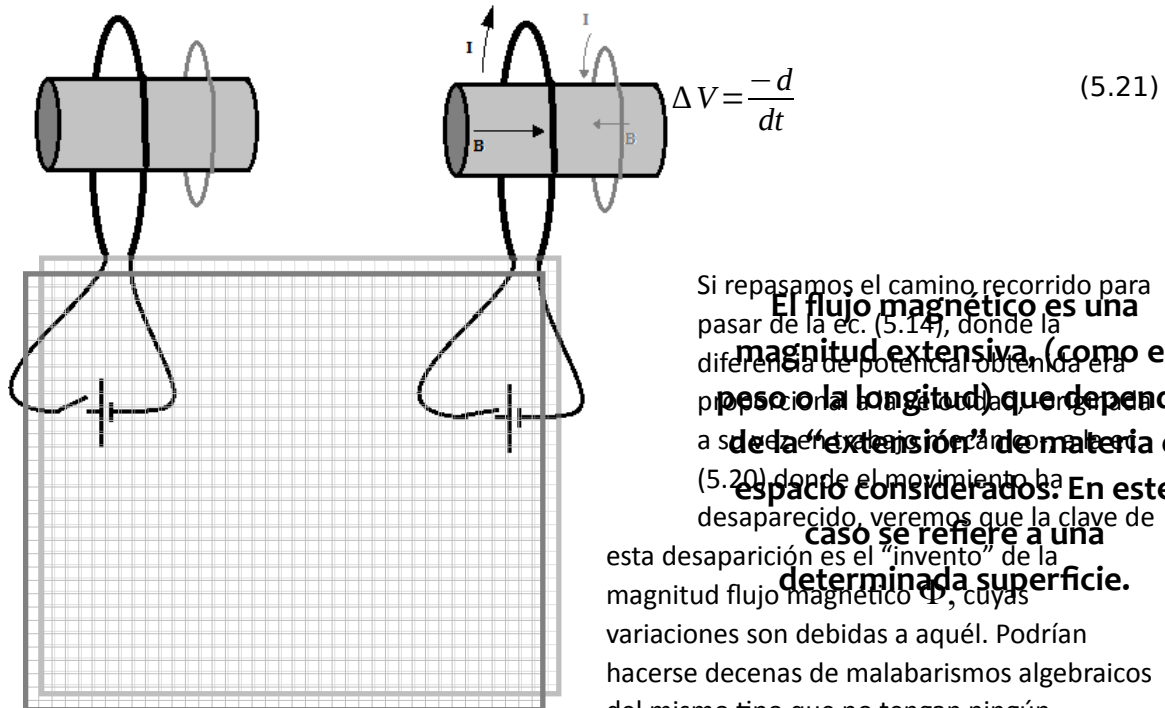
Veamos ahora que relación tiene el trabajo calculado más arriba con el flujo magnético: Al desplazamiento dx le corresponde una variación del área $a \cdot dx$, o sea:

$$d = B \cdot dS = B \cdot d \cdot dx \quad (5.19)$$

Dividiendo por dt :

$$\frac{d}{dt} = d \cdot B \cdot \frac{dx}{dt} = d \cdot B \cdot v \quad (5.20)$$

Y comparando (5.14) con (5.19):



Si repasamos el camino recorrido para pasar de la ec. (5.14), donde la diferencia de potencial obtenida era proporcional a la longitud l que dependía de la "extensión" de materia o espacio considerados. En este caso se refiere a una determinada superficie.

variaciones son debidas a aquél. Podrían hacerse decenas de malabarismos algebraicos del mismo tipo que no tengan ningún

significado físico. Lo notable en este caso es que, efectivamente, *imaginando* la existencia de las líneas de campo, resulta que es su variación, *obtenida mediante cualquier recurso* (y no sólo por el movimiento), la causa de que aparezca ΔV .

El movimiento, entonces, resulta ser sólo un recurso para provocar una variación en la interacción entre los campos magnéticos. Esto tiene implicancias teóricas y prácticas muy importantes. Nos ocuparemos próximamente de alguna de éstas.

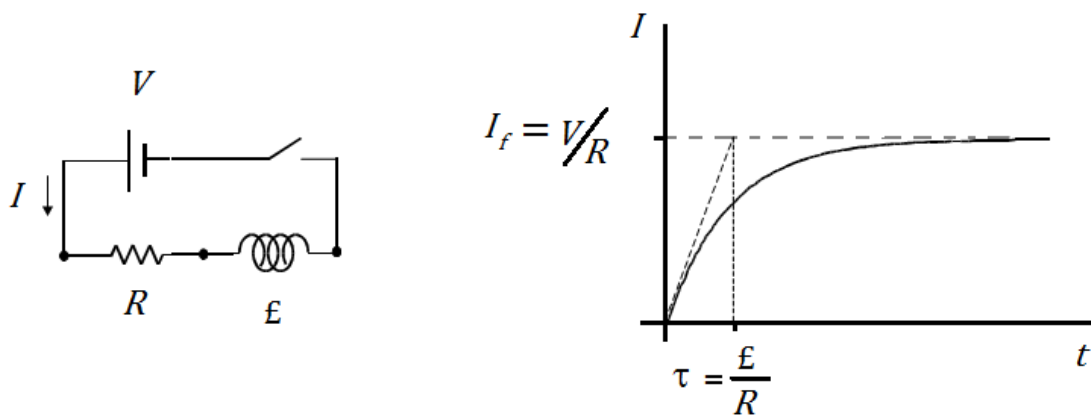
La variación de flujo magnético en el tiempo es causa necesaria y suficiente, (no es necesario un conductor, ni siquiera materia) para la aparición de un campo eléctrico y con él, una diferencia de potencial.
Si además, hay un camino conductor, aparecerá una corriente eléctrica.
La fem y la corriente inducidas poseen una dirección y sentido tales que se oponen a la variación que las provocan.

El signo negativo que aparece en la ecuación anterior tiene que ver con la dirección de la *fem* inducida. Esto está expresado en la **Ley de Lenz**:

Que es un caso particular de un principio más general que expresa la resistencia o inercia de algunos sistemas a cambiar de estado y que es una consecuencia de la conservación de la energía. Veamos algunos ejemplos:

Figura 5.9. ¿Cuál será el sentido de circulación de la corriente en la espira gris al cerrar la llave?

- 1) En el conductor que hemos estado considerando, la corriente que circula tendrá un sentido tal que el campo que crea, refuerza el campo dentro del circuito, oponiéndose a la disminución del flujo. Además, aparece una fuerza opuesta a la que hace desplazarse al conductor.



- 2) Si lo que hacemos es variar el flujo magnético que atraviesa la espira por otros medios, por ejemplo, si el campo \mathbf{B} está originado por una corriente eléctrica, en un circuito vecino, que se hace aumentar, la Ley de Lenz exige que la corriente inducida origine un campo que se oponga al original, tendiendo a evitar el aumento de flujo. Al mismo tiempo induce una fem en el circuito vecino, que se opone al aumento de corriente. En el ejemplo de la fig. 5.9, al cerrar la llave, se origina un campo que crece desde 0, entonces en la espira gris se induce una corriente, cuyo campo asociado se opone al que está creciendo.

Ejercicio 5.3:

Compruébense ambas afirmaciones, aplicando la regla del tornillo a la corriente generada y la regla de la mano derecha al movimiento de las cargas.

4.3 Autoinducción.

Si tenemos un solo circuito en vez de dos, también habrá una interacción entre la corriente eléctrica y el campo magnético que origina. Interacción que será tanto más

notable cuanto mayores sean I y B y sus variaciones. Ya vimos que el campo magnético puede ser particularmente intenso en el interior de las bobinas, por lo que podemos esperar que este fenómeno, llamado autoinducción esté particularmente asociado con la presencia de bobinas. Efectivamente, es así. Se define el coeficiente de autoinducción o inductancia (L) de un circuito o de un componente eléctrico a la relación:

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (5.22)$$

La unidad SI de la inductancia será **Wb / A** y recibe el nombre de Henry o Henrio (**H**)

La inductancia de un *Figura 5.10. Circuito RL y transitorio asociado.* componente
depende de factores geométricos.

Para un solenoide, puede demostrarse la siguiente relación:

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot S \cdot l \quad (5.23)$$

Donde, n es el número de vueltas por unidad de longitud, S es la sección transversal, l es la longitud.

Debido al fenómeno descrito por la ley de Lenz, en un circuito con inductancia y resistencia, las variaciones de la intensidad de corriente no son instantáneas, sino que cumplen una relación exponencial como sucede en el caso de la carga y descarga de un condensador. Así para un circuito elemental como el de la fig. 5.10, se genera un transitorio según la curva mostrada en la misma:

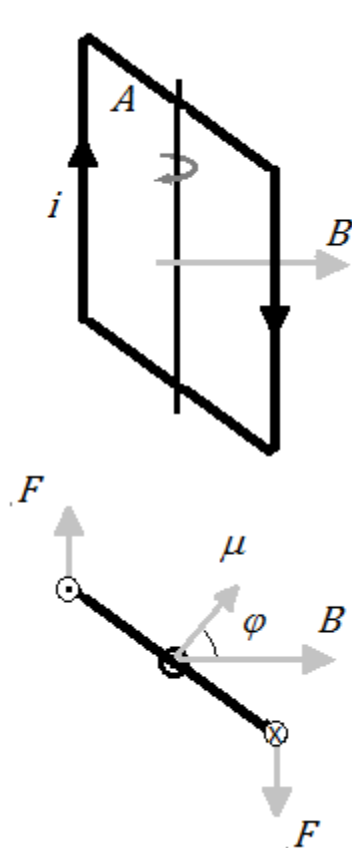
Y consideraciones simétricas, similares al caso de los circuitos con capacitores, pueden hacerse para el momento de la desconexión. Las funciones correspondientes son:

$$I = I_f \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.24)$$

Al cerrar la llave, y:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.25)$$

al desconectar. Donde



$$I_f = \frac{V}{R} \quad \gamma$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Donde τ es nuevamente un tiempo característico, esta vez de un circuito RL.

5. MOMENTO MAGNÉTICO

Sea una espira rectangular de superficie A , con un eje de rotación vertical, por la que circula una corriente i , atravesada por un campo magnético B , horizontal, con el que forma un ángulo φ , como muestra la fig. 5.11

Las fuerzas que actúan sobre los tramos horizontales de la espira son iguales y opuestas y sus efectos se neutralizan mutuamente. En cambio, sobre los tramos verticales, aunque las fuerzas también son idénticas en valor absoluto y tienen direcciones opuestas, al no coincidir sus rectas de acción, se origina un *torque* que tiende a hacer girar la espira, hasta alcanzar una posición de equilibrio (con ambas fuerzas alineadas).

Figura 5.11. Una espira de corriente, colocada en un campo magnético, se alinea con el mismo. Arriba: vista lateral. Abajo: vista superior.

Se llama torque de una fuerza a la magnitud vectorial que expresa la capacidad para producir un giro o rotación alrededor de un eje, y está representado por un vector que es el resultado de:

$$\tau = r \times F$$

Donde r es el vector posición que une el punto de giro con el punto de aplicación de la fuerza F . En el caso que nos ocupa el torque total será:

$$\tau = 2r \times F$$

En lugar de considerar cada tramo de la espira, nos conviene pensar en el campo magnético \mathbf{B}_e generado por i , que no se muestra en la fig 5.11, pero cuya dirección, como será evidente enseguida, coincide con la del vector $\boldsymbol{\mu}$. Y se ve, entonces que en la posición de equilibrio mencionada, el campo exterior \mathbf{B} y \mathbf{B}_e , coincidirán en dirección y sentido, *sumando sus efectos*.

Puede demostrarse fácilmente (no lo haremos aquí) que definiendo la cantidad vectorial

$$\boldsymbol{\mu} = i \cdot \mathbf{A} \quad (5.26)$$

donde \mathbf{A} es el vector que representa el área rodeada por la espira, resulta:

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B} \quad (5.27)$$

$\boldsymbol{\mu}$, entonces, es una cantidad que describe las propiedades magnéticas de la espira de corriente y se le dio el nombre de **Momento dipolar magnético** o, simplemente, **Momento magnético**.

De una inspección de la fig. 5.11 resultará evidente que $\boldsymbol{\mu}$ y \mathbf{B}_e tienen la misma dirección (la dirección de \mathbf{A}), y que el momento magnético tiende a alinearse con el campo exterior, *reforzándolo*. Obsérvese que este comportamiento (de una espira) es opuesto al de los dipolos eléctricos, que como fue descrito en la sección 1.4, tienden a neutralizar el campo exterior.

Cualquier objeto que tenga un campo magnético asociado, sea una espira, un solenoide, un electrón, una molécula, un imán o un planeta, se comportará, bajo la acción de un campo, de la misma forma, por lo que podemos asignarle un valor de su momento magnético, posiblemente medible a través de la ec. (5.27).

El concepto de momento magnético nos será de gran utilidad para describir las propiedades magnéticas de la materia.

Ejercicio 5.4:

Considere un imán de barra como el ilustrado. Dibuje las líneas de campo a su alrededor y compare con el solenoide de la fig.5.3. Represente los momentos magnéticos de ambos dispositivos y explique cómo se orientarían espontáneamente si se ponen uno en presencia del otro.



6. LAS ECUACIONES DE MAXWELL. NATURALEZA DE LA LUZ

Recordemos la ec. (1.13)

$$N = \Phi_E = \oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.13)$$

Es una de las expresiones del Teorema de Gauss, que nos dice que el flujo del vector **E**, a través de una superficie cerrada, es proporcional a la carga eléctrica encerrada por dicha superficie. ¿No se podrá escribir una expresión igual para el campo magnético? Claro que podemos definir el flujo del vector **B**, a través de una superficie cerrada como:

$$\oint B \cdot dA$$

Que no es más que una extensión de la ec (5.16), pero, ya que experimentalmente se comprueba que no existen cargas magnéticas aisladas, el segundo miembro debe ser nulo. Entonces:

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (5.28)$$

Estas expresiones nos describen los campos eléctrico y magnético *independientemente del tiempo*. Pero también hemos visto que suceden cosas inesperadas cuando un campo magnético no permanece constante. Así, la ley de Faraday, según la ec. (5.21):

$$\Delta V = \frac{-d}{dt} \quad (5.21)$$

Predice la aparición de un campo eléctrico con la variación del flujo magnético. La ley de Faraday puede generalizarse:

$$\oint E \cdot dr = \frac{-d}{dt} \quad (5.29)$$

Donde el primer miembro, -circulación de **E**-, se calcula como la integral de línea sobre un camino cerrado y el flujo del segundo miembro es el que atraviesa cualquier superficie apoyada sobre ese camino.

También encontramos que una corriente eléctrica tiene a su alrededor un campo magnético, descrito por la Ley de Ampère. Ec (5.6)

$$\oint B \cdot dr = \mu_0 \cdot I \quad (5.6)$$

Maxwell comprendió que la ley de Faraday sólo contemplaba un aspecto de la relación entre los campos magnéticos y los campos eléctricos, la que describía su origen en las cargas en movimiento, (como el teorema de Gauss describe la generación del campo eléctrico por las cargas en reposo) y que faltaba expresar la situación simétrica de la Ley de Faraday; esto es que los campos eléctricos variables generan campos magnéticos.

Esta cuestión se expresa hoy agregando el término correspondiente a la ec. (5.6) que conocemos ahora como ecuación de Ampère-Maxwell:

$$\oint B \cdot dr = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (5.30)$$

donde reaparecen viejos conocidos:

ϵ_0 = permitividad del vacío, ec. (1.4).

Φ_E = flujo eléctrico, ec. (1.12).

En la Tabla 5.1 se presenta lo que hoy conocemos como Ecuaciones de Maxwell, después del trabajo de Heaviside:

$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.13)$	Ley de Gauss.	Describe la relación entre la carga eléctrica y el campo generado.
$\oint B \cdot dA = 0 \quad (5.28)$	Ley de Gauss para el magnetismo.	Describe la inexistencia de las cargas magnéticas.
$\oint E \cdot dr = -\frac{d}{dt} \quad (5.29)$	Ley de Faraday.	Describe la generación del campo eléctrico por las variaciones del campo magnético.
$\oint B \cdot dr = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (5.30)$	Ley de Ampère-Maxwell	Describe la generación del campo magnético por cargas en movimiento y por variaciones del campo eléctrico

Tabla 5.1. Las ecuaciones de Maxwell-Heaviside

Si a esto agregamos la fuerza que actúa sobre una carga:

Ley de Lorentz

$$F = F_E + F_B = q \cdot (E + v \times B) \quad (5.3)$$

Tenemos la descripción completa del fenómeno electromagnético.

Pero en estas ecuaciones había escondida una gran sorpresa. Según vimos en la Unidad I:

$$\epsilon_0 \cong 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \times m^2}$$

Y en esta Unidad V:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T}{m \cdot A}$$

Entonces el producto de ambas constantes, que aparece en la ec. (5.30) será:

$$\epsilon_0 \cdot \mu_0 = 0,111212 \times 10^{-16} \frac{s^2}{m^2}$$

Con dimensiones de la inversa del cuadrado de una velocidad. Entonces hagamos:

$$\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cong 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Maxwell mostró que el factor que aparecía en la ec. (5.30)¹⁰ era, justamente la inversa del cuadrado de la velocidad con que debía propagarse una perturbación, originada en la transformación mutua de campos eléctricos y magnéticos, *en ausencia de las cargas que originan los campos*. En esas condiciones, la ec (1.13) se hace nula, (igual que la (5.28)) y la (5.30) pierde el primer término del segundo miembro, haciéndose análoga a la (5.29) y todo el conjunto adquiere una notable simetría.

Pero la sorpresa a la que nos referíamos arriba y en la que reparó Maxwell, es que ese valor de la velocidad, ¡coincide con la velocidad de la luz, determinada experimentalmente! De allí, deducir que la luz era una radiación electromagnética, era la consecuencia obligada.

Poco después, Hertz encontró experimentalmente que las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell, realmente existían y la naturaleza física de la luz apareció revelada a los ojos de los científicos. Y no sólo de la luz visible. Pronto quedó claro que la radiación ultravioleta y la infrarroja constituían sus límites en ambas direcciones de la variación de la frecuencia y que más allá de esos límites había otras radiaciones invisibles, tan reales como la luz misma.

Posteriormente, la teoría de la relatividad precisó el significado de respecto a qué había que considerar la velocidad y la física cuántica modificó la concepción de la onda, otorgándole un extraño carácter dual onda-partícula.

En las figuras 5.12 y 5.13 se representan el espectro electromagnético y una onda electromagnética, respectivamente.

¹⁰ $1C=1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ En realidad, Maxwell utilizaba otro tipo de notación matemática, bastante más complicado. La forma actual de estas ecuaciones, que originalmente eran veinte y no cuatro, y su simplificación, se deben al trabajo de Oliver Heaviside que, fascinado por la obra de Maxwell, dedicó buena parte de su vida a comprenderla a fondo y difundirla.

RESUMEN

La interacción magnética básica es la fuerza que existe entre dos cargas eléctricas en movimiento relativo. Esta fuerza se suma a la electrostática. Como en las otras interacciones a distancia, se supone que la fuerza se transmite a través de otro agente: *el campo magnético*. La fuerza total, debida a los campos eléctrico y magnético, que experimenta una carga, se conoce como Fuerza de Lorentz.

Tanto un imán permanente como una carga en movimiento, como una corriente eléctrica, generan alrededor suyo un campo magnético, que es el portador de la interacción con otros sistemas que también poseen un campo magnético asociado.

Definimos intensidad de campo magnético como la fuerza que actúa sobre la carga unitaria, moviéndose a velocidad unitaria, perpendicularmente al campo. La unidad resultante: **N.s/C.m** recibe el nombre de Tesla (**T**).

A diferencia de lo que sucede en el campo eléctrico, la fuerza no tiene la dirección de las líneas de campo, sino que es perpendicular a ellas y a la dirección del movimiento. Otra diferencia importante es que las líneas magnéticas tienen trayectorias cerradas.

La Ley de Ampère permite calcular las intensidades de campo creadas por corrientes eléctricas que circulan por un conductor lineal u otras configuraciones como los solenoides. Y mediante la “regla del tornillo” se determina el sentido que tienen las líneas de campo, que en el caso del solenoide se refuerzan en su interior, lo que significa que el campo está mayormente confinado allí.

El “efecto motor” explica la conversión de energía eléctrica en trabajo mecánico, que se utiliza en los motores eléctricos, mientras que el “efecto generador” se refiere al proceso opuesto, que se utiliza en los generadores eléctricos.

La llamada “fuerza electromotriz” (*fem*), (que no es una fuerza) es la energía de cualquier origen que se transforma en energía eléctrica y se mide en voltios. La *fem* es la causa de que se genere una diferencia de potencial en los dispositivos generadores.

El flujo magnético es una magnitud proporcional al número de líneas que atraviesa una superficie dada, ya que B (propiedad intensiva) es proporcional a la densidad (n° de líneas por unidad de área) de las mismas. La unidad SI correspondiente es el Tesla x metro cuadrado y recibe el nombre de Weber (**Wb**).

La Ley de Faraday-Lenz establece que la variación de flujo magnético en el tiempo es causa necesaria y suficiente, para la aparición de un campo eléctrico y con él, una diferencia de potencial. Si además, hay un camino conductor, aparecerá una corriente eléctrica y la *fem* y la corriente inducidas poseen una dirección y sentido tales que se oponen a la variación que las provocan.

El coeficiente de autoinducción o inductancia (\mathcal{L}) de un circuito o de un componente eléctrico se define como la relación del flujo magnético generado a la corriente que circula. La unidad SI de la inductancia es **Wb / A** y recibe el nombre de Henry o Henrio (**H**). La presencia de inductancia en un circuito provoca la aparición de etapas transitorias, donde la intensidad de corriente varía con el tiempo hasta alcanzar un valor de equilibrio, de una forma análoga a lo que ocurre en los circuitos con capacidad (capacitancia).

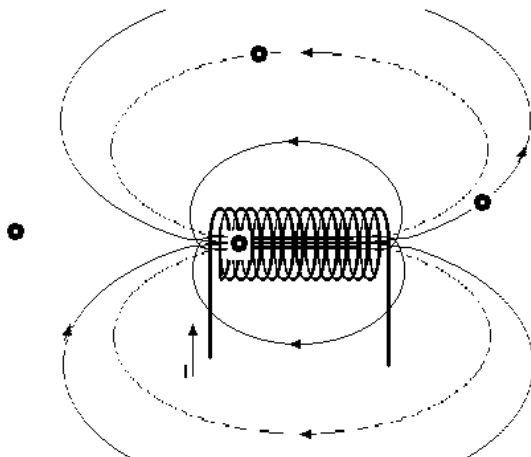
Cualquier objeto que tenga un campo magnético asociado, se comportará, bajo la acción de un campo, girando para colocarse en una posición de mínima energía potencial. Este comportamiento puede describirse cuantitativamente mediante el momento magnético μ , que relaciona el torque de giro que actúa con el campo magnético aplicado.

Las leyes de Maxwell-Heaviside más la ley de Lorentz describen todo el electromagnetismo “clásico”. De las primeras, además, se puede inferir la naturaleza física de la luz y otras radiaciones.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1) Considere el solenoide de la fig 5.4:

a) En los puntos marcados indicar la orientación de una brújula y la de una espira de corriente.



b) Indicar la dirección de la fuerza que actuaría sobre una carga positiva moviéndose en el plano del papel y perpendicular a las líneas del campo.

c) Explicar cómo las líneas de campo informan sobre la intensidad B y el flujo Φ .

2) En un campo magnético uniforme de $B = 6,5 \times 10^{-4} \text{ T}$, ¿qué superficie plana que forma un ángulo de 45° se debe abarcar para tener un flujo magnético $\Phi = 1 \text{ Wb}$?

3) Por un conductor circula una corriente de 10A.

a) Calcular el valor de la intensidad del campo magnético B a 10 cm de distancia e indicar su dirección y sentido mediante un croquis.

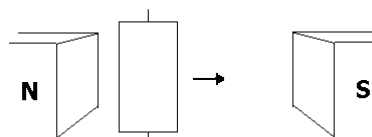
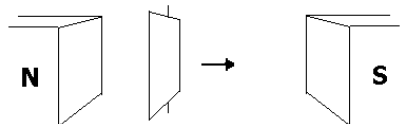
b) Indicar la dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre otro conductor igual, por el que circula la misma corriente, colocado en forma paralela a 10 cm de distancia.

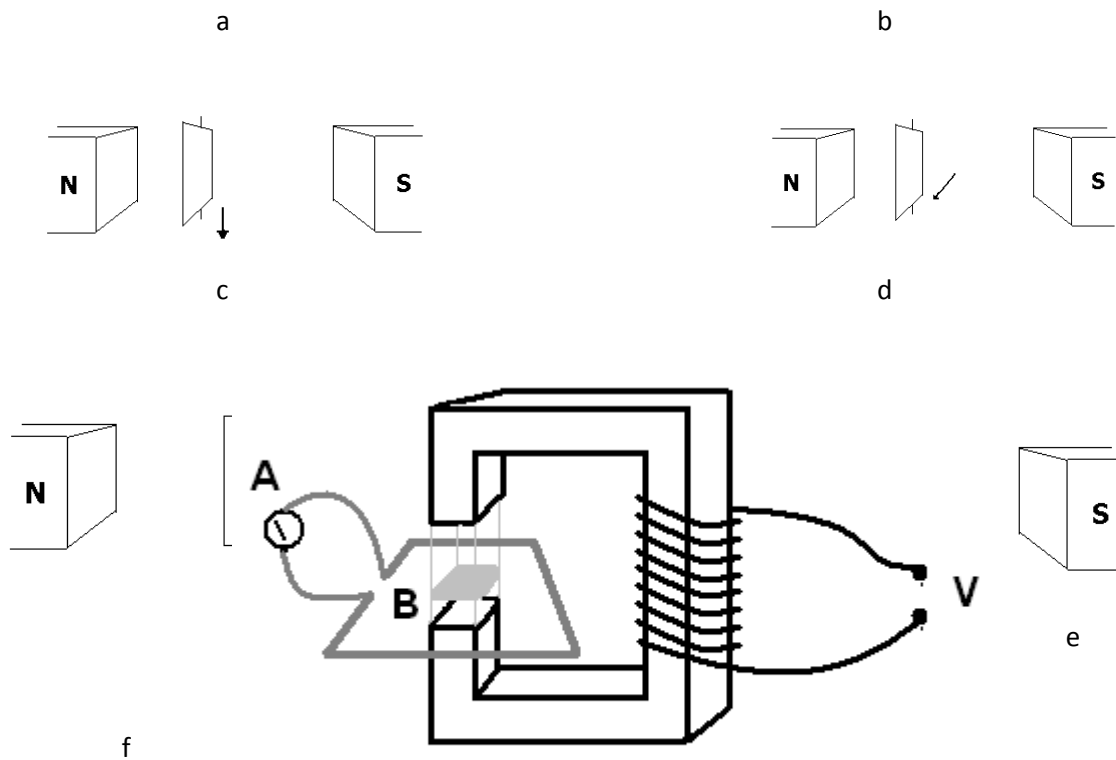
4) Una bobina por la que circula una corriente de 50mA, induce en su interior un campo magnético de 10^{-6} T . ¿Qué intensidad de corriente debe circular por otra bobina, de la misma longitud, que tiene alambre de la mitad de diámetro que la anterior para obtener el mismo B ? Ambas bobinas tienen sus espiras lo más juntas posible.

5) Diseñe una bobina por la que, circulando una intensidad de corriente de 0,1 A, en su interior se genere un campo magnético de la misma intensidad que el terrestre (10^{-4} T).

6) Se tiene una espira de 10 cm de diámetro, por la que circula una corriente de 0,2A. Calcule el torque generado por un campo magnético de 0,02 T.

7) ¿En cuál de los siguientes casos se induce una corriente eléctrica, en la espira conductora que se mueve de las diferentes maneras indicadas? ¿De qué factores depende la intensidad de la corriente inducida? Considere que el campo generado por el imán es horizontal y uniforme en *toda* el área de movimiento de la espira.

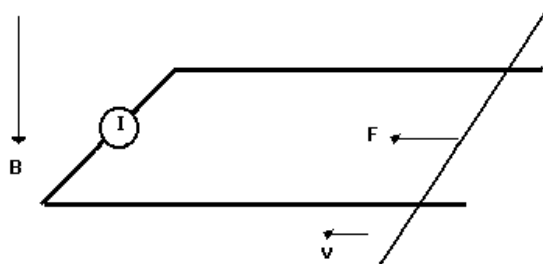




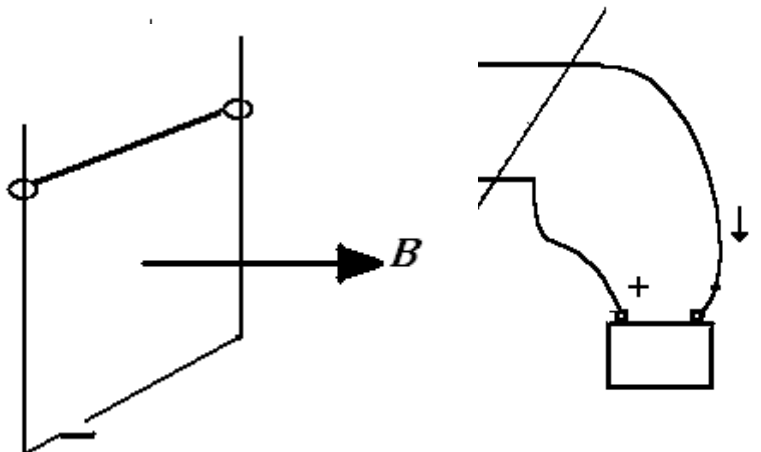
8) En el dibujo de abajo, el electroimán crea un campo **B**, confinado en una pequeña zona, lejos de los alambres de la espira conductora. Indicar qué se observará en el amperímetro **A** si:

- la situación es exactamente la descrita en el dibujo.
- se provoca una variación en el valor de **V**.
- se desplaza la espira horizontalmente, siempre con el campo **B**, dentro del área de la espira.
- se desplaza la espira fuera del campo **B**.
- se desplaza el electroimán horizontalmente.

9] En la experiencia ilustrada abajo, **F** es la fuerza que es necesario aplicar para que el conductor se mueva a velocidad constante **v** y circule una corriente **I**. ¿Qué es lo que varía si se aumenta el valor de **F**? ¿Y si se aumenta **B**, manteniendo **F** constante?



10] En esta experiencia, I es la intensidad de corriente que hace circular la tensión de la batería, v es la velocidad de desplazamiento constante del conductor móvil. ¿qué sucede si se aumenta la tensión de la batería? ¿Y si se frena, mediante una fuerza exterior, el desplazamiento del conductor?



11) Una varilla conductora cae deslizándose sobre carriles paralelos verticales, unidos por su parte inferior, que cuenta con una llave que abre y cierra el circuito, como muestra el dibujo. En la región existe un campo magnético B uniforme y perpendicular al plano del área barrida por la varilla

- ¿Qué diferencias se observará en el movimiento de la varilla, con la posición de la llave?
- Con la llave abierta. ¿Se genera una diferencia de potencial entre los extremos de la varilla? ¿Qué polaridad presenta si es así? ¿Se induce una corriente eléctrica?
- Con la llave cerrada. ¿En qué sentido circulará la corriente? Si usted fuese el profesor, ¿qué datos debería proporcionar a sus estudiantes para que calculen la intensidad de corriente inducida?

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_//problemas/electromagnetismo/induccin/problemas/induccin_problemas.html

<http://personales.upv.es/jquiles/prffi/indice.htm>

RESPUESTAS Y COMENTARIOS

Ejercicio 5.1:

Ya que la fuerza se puede calcular como un producto vectorial, será máxima cuando velocidad y campo sean exactamente perpendiculares y nula cuando tengan la misma dirección

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1)

- a) *La brújula se orienta paralela a las líneas de campo. La espira de corriente alinea su momento dipolar, haciendo que el flujo que la atraviesa sea máximo.*
- b) *Perpendicular al papel, en una u otra dirección*
- c) *La intensidad B es proporcional a la densidad de líneas. El flujo Φ a través de una superficie es proporcional al número de líneas que la atraviesan.*

2) $S = 4,6 \times 10^4 \text{ m}^2$.

3) a) $B = 2 \times 10^{-5} \text{ T}$.

- b) *Resulta una fuerza en la dirección perpendicular a los conductores, de atracción si las corrientes tienen el mismo sentido y de repulsión en caso contrario.*

4) $I = 25 \text{ mA}$. (Si el alambre tiene la mitad del diámetro, n/L es el doble).

6) $\tau = 3,14 \times 10^{-5} \text{ N.m}$. (Obsérvese que, por su definición, Tesla = N/A.m).

7) *Sólo en el caso “e”, el movimiento ocasiona una variación del flujo. La fem ΔV depende de B y de la velocidad de rotación. I depende de ΔV y de la resistencia del circuito.*

8)

- a) *El amperímetro no detecta corriente alguna.*
- b) *Mientras V esté variando el amperímetro detectará una corriente.*
- c) *El amperímetro no detecta corriente alguna. (Los conductores de la espira están fuera del campo magnético, por lo que no hay ninguna interacción o alternatively, el flujo que atraviesa la espira no cambia y no se produce inducción)*
- d) *Se detecta una corriente*
- e) *Lo mismo que los casos c) y d), dependiendo de la amplitud del desplazamiento.*

9) *Al aumentar F, aumentará la velocidad de desplazamiento, la razón de cambio del flujo, la fem inducida y la intensidad que circula.*

Al aumentar B , aumentará la fuerza que se opone al movimiento, disminuirá la velocidad, la razón de cambio del flujo, la fem inducida y la intensidad que circula. El trabajo que hace F es el mismo, pero la potencia desarrollada es menor.

10) Si se aumenta la tensión de la batería, aumentará la corriente que circula por el conductor móvil y la velocidad de equilibrio con la que se desplaza.

Si se dificulta o impide el desplazamiento, disminuirá la resistencia aparente del conductor, provocando un aumento de la intensidad de corriente que puede terminar en un cortocircuito.

11)

a) Al cerrarse el circuito, circulará una corriente inducida, cuyo campo magnético asociado se opondrá al movimiento.

b) Con la llave abierta se genera una fem pero no puede circular corriente. Aplicando la regla de la mano derecha, se ve que las cargas positivas son impulsadas de atrás hacia adelante del plano del papel, adquiriendo carga positiva el extremo del alambre más próximo al lector..

c) La corriente en la espira, vista de frente, tendrá sentido anti-horario. Suponiendo que el movimiento no presenta fricción, será necesario conocer la geometría de la espira, su resistencia eléctrica y la intensidad el campo magnético.

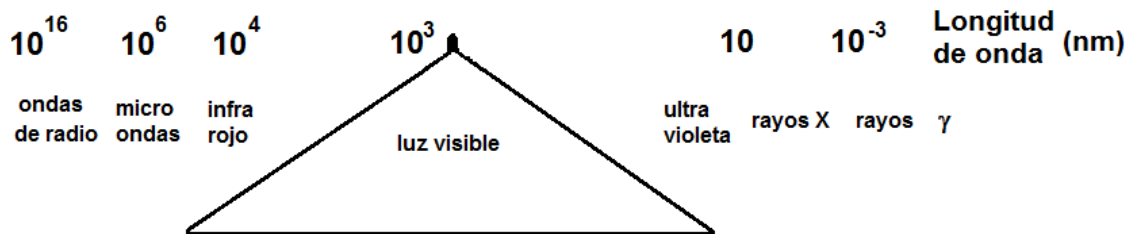
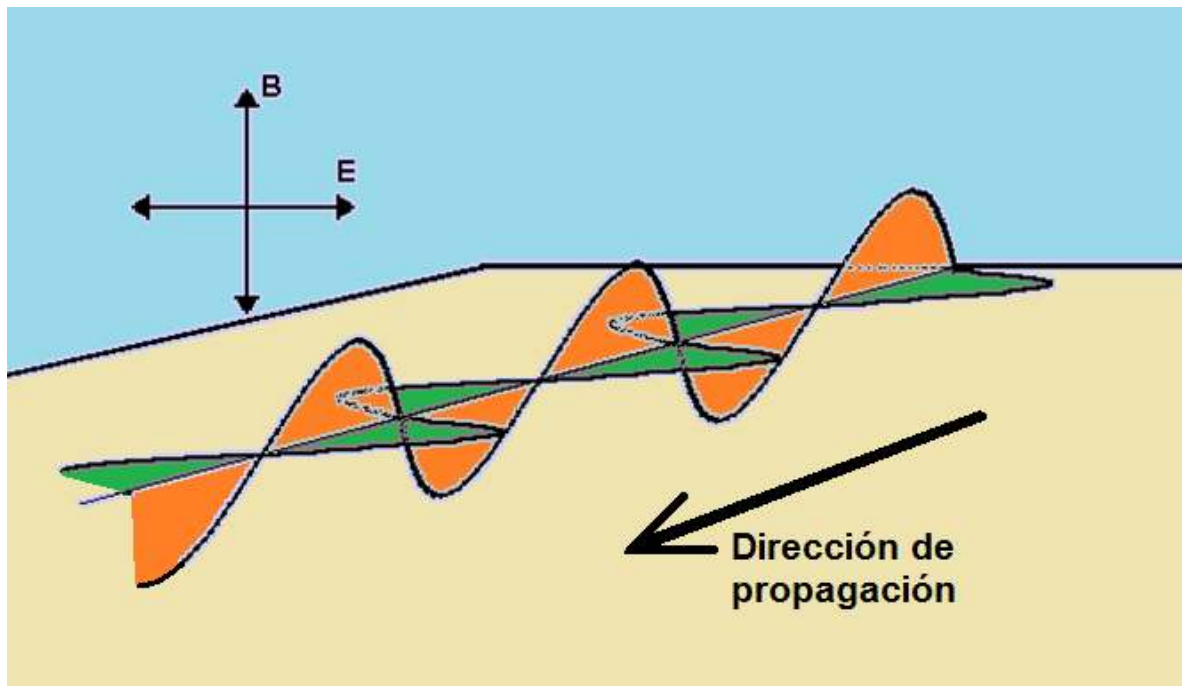


Figura 5. 13. En una onda electromagnética el componente eléctrico, el magnético y la dirección de propagación son perpendiculares entre sí.



Capítulo 4

Figura 5.12. Espectro de radiación electromagnética. Cada color que vemos corresponde a una longitud de onda (y frecuencia) determinada.



PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LA MATERIA

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de magnetismo ya era conocido por los antiguos griegos, que habían observado que un mineral proveniente de Magnesia, atraía a los objetos de hierro. Ese mineral recibió posteriormente el nombre de magnetita, y es un óxido de hierro muy abundante en las arenas de nuestro litoral atlántico. Se sabe que ya en el siglo XII, se utilizaba un tipo de brújula en la navegación. Pronto se observó que los cuerpos magnetizados presentaban *siempre* dos polos o regiones hacia donde parecía dirigirse las fuerzas de atracción y repulsión y que estos polos

eran opuestos. Esto se relacionó con la orientación que tomaban agujas imantadas, señalando aproximadamente la dirección norte-sur, y se les dio los nombres de polo norte y sur.

Pese a estos antiguos antecedentes y que bastante se ha avanzado en la comprensión de sus mecanismos básicos, quedan todavía unos cuantos aspectos de la interacción magnetismo-materiales cuya explicación y modelización no son satisfactorios. La mecánica cuántica, como en otros campos, parece ser la herramienta adecuada para desentrañar algunos de los misterios que todavía subsisten.

De todas formas, las aplicaciones prácticas del magnetismo y los materiales magnéticos, abarcan una enorme gama de técnicas y dispositivos, desde la generación de energía a equipos médicos, teléfonos, televisión, vehículos y muchísimos otros ejemplos de los que no escapan los sistemas de información y comunicación.

Veremos, en esta unidad, los comportamientos de los diferentes materiales frente a los campos magnéticos y las aplicaciones que se derivan de ellos, con especial énfasis en los diversos usos informáticos.

2. MATERIALES MAGNÉTICOS

Se pueden clasificar los materiales según su diverso comportamiento respecto del fenómeno magnético.

Materiales lineales	Diamagnéticos	Son débilmente repelidos por un imán.	Cobre, bismuto, helio, fluoruros, sales de sodio.
	Paramagnéticos	Son débilmente atraídos por un imán.	Sodio metálico, aluminio.
Materiales no lineales.	Ferromagnéticos	Son fuertemente atraídos por un imán.	Hierro, cobalto, níquel. Metales de transición interna. (Tierras raras)
	Anti ferromagnéticos	No son atraídos ni repelidos por un imán	Manganeso, cromo
	Ferrimagnéticos	Son fuertemente atraídos por un imán, (aunque generalmente, menos que un ferromagnético).	Magnetita, ferritas sintéticas.

Tabla 6.1. Clasificación de los materiales según su comportamiento frente a campos magnéticos

Veremos cómo tratar cuantitativamente las propiedades de estos materiales.

3. EL CAMPO H

En la unidad anterior definimos intensidad de campo magnético B , en relación a la fuerza ejercida sobre una carga móvil. Su módulo es, según la ec. (5.4):

$$B = \frac{F}{q \cdot v \cdot \sin \alpha} \quad (5.4)$$

definición análoga a la de intensidad de campo gravitatorio o eléctrico. Ec (1.5):

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.5)$$

Históricamente hay otra definición, basada en la corriente eléctrica que genera el campo en un solenoide de longitud infinita. Su módulo viene dado por la ec (6.1):

$$H = \frac{n}{L} \cdot I \quad (6.1)$$

Donde n/L = densidad de espiras (m^{-1})

I = intensidad de corriente (A).

Por otro lado, habíamos encontrado que el campo magnético generado por un solenoide de longitud infinita, en un punto de su interior:

$$B = \mu_0 \frac{n \cdot I}{L} \quad (5.8)$$

Si se compara (6.1) con (5.8) resulta:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (6.2)$$

Como se ve, en el vacío, ambas magnitudes son proporcionales entre sí, dependiendo el factor de proporcionalidad del sistema de unidades que se emplee. Como hemos dicho anteriormente, en el SI $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m.A}^{-1}$.

Podemos darle a **H** otro significado, que nos resultará útil para el estudio de la interacción materia - campos magnéticos.

(11)

Consideraremos a **H como la magnitud que mide la “fuerza” magnetizante y lo llamaremos *excitación magnética* y a **B** como el campo resultante de esa excitación.**

Para un medio material cualquiera, sometido a la acción de un campo H , podemos escribir:

$$B = \mu \cdot H \quad (6.3)$$

Donde μ , *permeabilidad magnética*, es una característica de cada material que informa sobre su reacción ante un campo magnético. Haciendo un tratamiento análogo al que hicimos con la *permitividad eléctrica* (ec. 4.3), escribiremos:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (6.4)$$

11 $1C = 1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ Algunos autores llaman a **H** *intensidad de campo magnético* y entonces, B pasa a ser *inducción magnética* o *densidad de flujo*, pero el significado conceptual y la relación entre las magnitudes es la misma que describimos y que preferimos, por su analogía con el campo eléctrico y gravitatorio.

Pero, a diferencia del caso del campo eléctrico, μ_r (*permeabilidad relativa*) puede ser mayor o menor que 1, marcando la división entre los dos tipos de comportamiento de los materiales lineales:

$\mu_r < 1$	El campo magnético se debilita en el interior del material.	Materiales diamagnéticos
$\mu_r > 1$	El campo magnético aumenta en el interior del material.	Materiales paramagnéticos

En estos materiales, en los que μ_r no presenta variaciones significativas con los valores de H , su valor es muy próximo a la unidad. En la práctica, esto significa que es difícil apreciar, sin instrumental más o menos sofisticado, su comportamiento real frente al campo magnético.

Otro parámetro utilizado para medir esta propiedad es la *susceptibilidad magnética* χ (chi) cuya relación con la permeabilidad es:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (6.5)$$

Resultando entonces positiva para los paramagnéticos y negativa para los diamagnéticos.

Pero existen otros materiales, mostrados en la tabla 3.1, tecnológicamente más interesantes donde μ_r es mucho mayor que 1, (y, en consecuencia, χ puede alcanzar valores significativos), pero además ni permanece constante con las variaciones del campo, ni el material pierde su magnetismo en ausencia del campo exterior.

Históricamente se conoció con el nombre de *ferromagnetos* a todos los materiales que conservaban propiedades magnéticas intrínsecas, pero los avances del conocimiento sobre el tema llevaron a distinguir dentro de ellos a las varias clases diferentes que se ilustran en la tabla 3.1 .

4. EXPLICACIÓN MICROSCÓPICA

Un modelo descriptivo del distinto comportamiento de las sustancias frente a un campo magnético, parte de considerar a cada electrón en el átomo como un imán elemental. La descripción cuantitativa de estos imanes elementales y sus interacciones, requiere la utilización de recursos de mecánica cuántica, pero puede hacerse una descripción cualitativa en términos clásicos.

Considerando a los electrones como partículas cargadas que poseen dos tipos de movimiento, -uno de rotación alrededor del núcleo (*orbital*) y otro de rotación sobre su propio eje (*spin*), similares a los movimientos planetarios- puede comprenderse el origen del campo magnético del átomo, ya que como sabemos, las cargas en movimiento son la causa de los campos magnéticos.

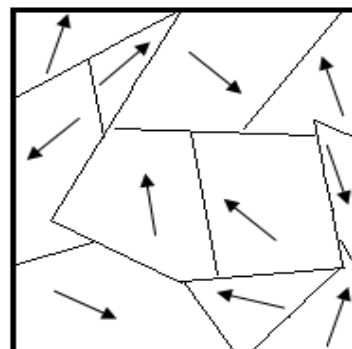
Recordemos la definición de momento magnético, que hicimos en la Unidad V ec. (5.26) y (5.27), de la que resulta la tendencia del momento μ a alinearse con el campo exterior, reforzándolo.

Los momentos magnéticos elementales pueden compensarse unos con otros o no, dando átomos y moléculas sin o con momento resultante, respectivamente.

81

El diamagnetismo es una propiedad que aparece únicamente cuando se aplica un campo exterior, se manifiesta debilitándolo y lo presentan las sustancias (y son mayoría) **cuyos átomos y moléculas no tienen un momento magnético permanente**. En estos casos, la interacción con el campo exterior puede modelizarse como si se tratara de una espira de corriente (el movimiento orbital del electrón) entre los polos de un imán.

La aparición del campo exterior, tal como predice la ley de Lenz, inducirá un campo que se le oponga. Es decir, el material se magnetiza con un momento magnético opuesto al campo aplicado. El efecto diamagnético es muy débil y, por la explicación que se dio, lo presentan todas las sustancias, aunque cuando están presentes los otros casos de magnetismo, lo enmascaran completamente. Cuantitativamente se caracteriza por una muy pequeña susceptibilidad negativa y permeabilidad relativa ligeramente menor que la unidad.



Todos los otros casos **son debidos al *spin* no compensado de los electrones que da origen a átomos o moléculas con momento magnético permanente**. Estos momentos elementales interactúan entre sí de diversas maneras, interacción que se ve afectada por la presencia de la agitación térmica, que siempre tiende a destruir el orden, o sea aumentar la entropía.

Cuando las distancias entre los imanes elementales son mayores (material magnéticamente diluido), las interacciones mutuas son obviamente menores y sólo la presencia de un campo exterior hace que se alineen, como haría un imán en el campo de otro mayor, reforzándolo. Este es el caso del *paramagnetismo*.

Pero si, por el contrario, la proximidad permite una interacción intensa, aparecen los que se conocen como “efectos cooperativos” que dan origen al ferro, anti-ferro y ferrimagnetismo.

En el primer caso, *ferromagnetismo*, (el que más nos interesa), los momentos tienden a disponerse paralelamente reforzando sus efectos. Se forman conglomerados microscópicos, llamados *dominios magnéticos* de un tamaño típico de unos 10^{-2} mm, conteniendo algunos billones de imanes elementales,

Figura 6.1. Dominios magnéticos de un material ferromagnético. Los vectores representan las diferentes orientaciones de μ .

Pueden verse fácilmente ver los límites (paredes de Bloch) de los dominios magnéticos con un microscopio

orientados en forma paralela, con lo que el dominio tendrá un momento magnético único, suma de todos los elementales. En la Fig. 6.1 se esquematiza esta situación. Debido al mencionado efecto desordenador de la agitación térmica, el comportamiento ferromagnético sólo se manifiesta por debajo de cierta temperatura

crítica, conocida como Temperatura de Curie. Por encima de ella el comportamiento es paramagnético.

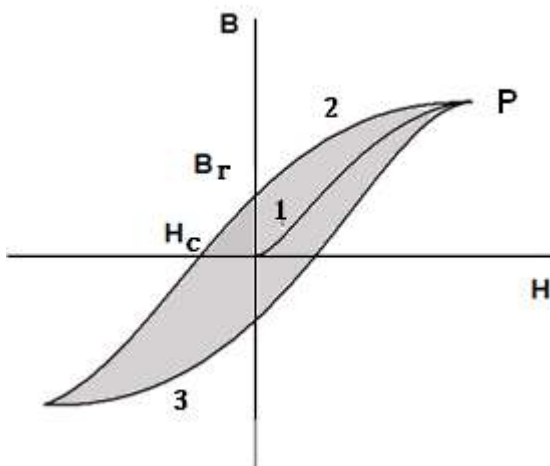
En el *antiferromagnetismo*, los momentos se disponen antiparalelamente, neutralizándose. A bajas temperaturas, se observa un comportamiento diamagnético pero la susceptibilidad va aumentando, hasta que a la Temperatura de Néel, pasa a presentar propiedades paramagnéticas.

El *ferrimagnetismo* puede explicarse como antiferromagnetismo, descompensado por la presencia de subestructuras cristalinas con momentos diferentes, por lo que no se alcanza la neutralidad total de los campos. La ya mencionada magnetita, de fórmula Fe_3O_4 , es un caso típico, ya que dos de los átomos de Fe presentan número de oxidación +3 y el restante +2, tratándose en realidad de una mezcla equimolecular de dos óxidos, cada uno con un sistema cristalino diferente. Los otros también suelen ser mezclas de óxidos, o cerámicas. No son conductores y encuentran su aplicación como ferromagnéticos de baja conductividad eléctrica. Se los conoce con el nombre genérico de ferritas.

5. MATERIALES FERROMAGNÉTICOS

Como dijimos, poseen electrones de valencia no apareados cuyos campos magnéticos de rotación se suman. Esto produce un campo magnético atómico lo suficientemente intenso, para provocar la formación de dominios magnéticos. Estos dominios constituyen, entonces, pequeños imanes que, si están orientados al azar, anulan sus efectos, pero si se alinean dan origen a un imán macroscópico.

La presencia de un campo magnético exterior causa que los dominios se alineen. Altas temperaturas, por el contrario, favorecen el desorden y la desmagnetización. Dependiendo del material y la temperatura, pueden obtenerse o no imanes permanentes, o sea que el material puede "recordar" si estuvo en presencia de un campo exterior. Este fenómeno se conoce como histéresis y es de enorme importancia práctica



comenzar a crecer H , los dominios se orientan, provocando un rápido crecimiento de la intensidad de campo dentro del material. A medida que este proceso de orientación se va completando, el crecimiento de B se hace más lento, hasta que cerca del punto P , todo el crecimiento es debido a H . Se dice que el material está *saturado* y todos los dominios están orientados en forma paralela.

para su uso en almacenamiento de datos.

Si se coloca una pieza de material ferromagnético, inicialmente desmagnetizado, dentro de un solenoide y, mediante el recurso de aumentar la intensidad de corriente, se lo somete a un campo magnético de intensidad H creciente, el campo B dentro del material evolucionará como muestra la figura. Al

Si a partir de este punto, se disminuye H , B también disminuirá pero la curva pasa por

Figura 6.3. Ciclo de histéresis. La energía disipada es proporcional al área grisada.

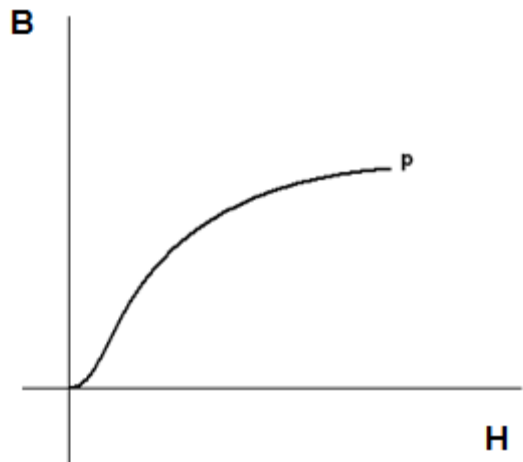
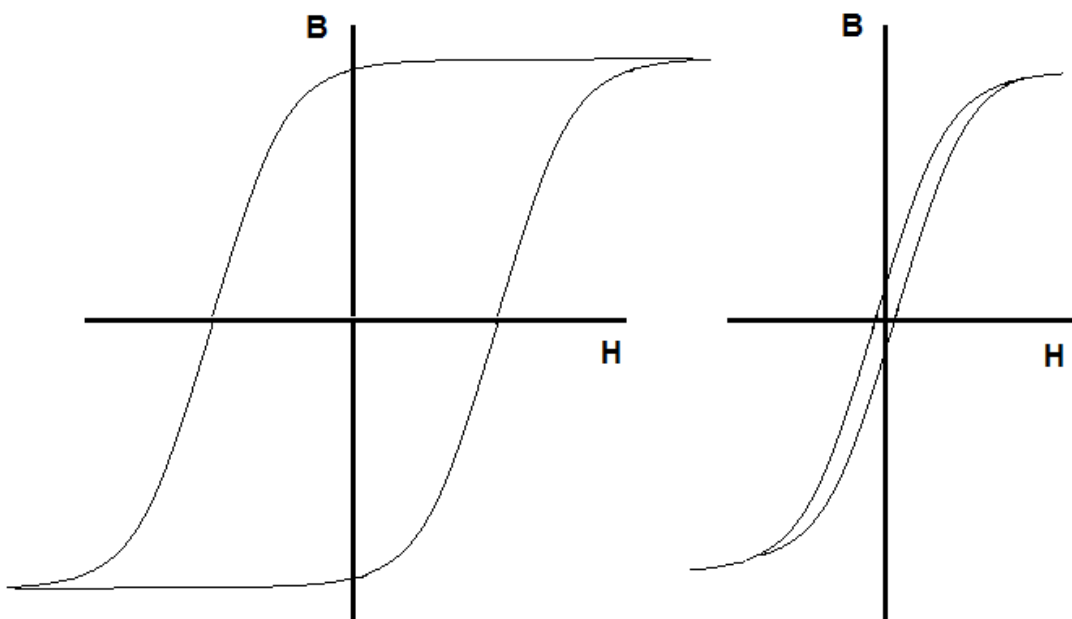


Figura 6.2 Curva de magnetización de un material ferromagnético



otros puntos, siguiendo un recorrido parecido al 2, (figura 6.3) con lo que cuando H sea nulo, todavía existirá un campo magnético remanente B_r . Tenemos así un imán permanente. Es necesario aplicar un campo exterior de signo opuesto H_c , campo coercitivo, para que el campo interior se anule. Si se continúa aumentando H hacia valores cada vez más negativos, se alcanza un punto simétrico a P en el tercer cuadrante.

Si ahora se disminuye el campo hasta anularlo, y se vuelve a aumentar con el signo cambiado, el ciclo se completa por la curva 3 hasta alcanzar nuevamente el punto P . Si se repite esta operación, el sistema recorre siempre el mismo ciclo, conocido como *ciclo de histéresis*.

La magnetización de un material que presenta histéresis se realiza a expensas de energía, que se disipa en forma de calor. Puede demostrarse que esta energía es proporcional al área encerrada por las curvas, por lo que se comprende que materiales con bajo H_c , valor del campo necesario para anular completamente el magnetismo remanente, conocidos como *magnéticamente blandos*, serán adecuados para la mayoría de las máquinas eléctricas (ver Unidad VII).

Valores elevados de B_r y H_c , identifican a los materiales *magnéticamente duros*, adecuados para la obtención de imanes permanentes y dispositivos de almacenamiento de datos. En este último caso, se busca, además de un buen valor de campo remanente, que la forma de la curva sea lo más cuadrada posible, o sea que el valor de B sea rápidamente adaptable a uno.

Figura 6-4. Ciclo de histéresis de un material magnéticamente duro (a) y blando (b).

determinado valor negativo de H ya que esto determinará un límite preciso entre los estados 1 y 0 de un dispositivo digital. (Ver no obstante, más abajo. Aplicaciones)

6. APLICACIONES

Son innumerables las aplicaciones tecnológicas de los diversos materiales magnéticos. En la Unidad VII veremos algunas en el campo de la generación, utilización y transporte de la energía eléctrica. Aquí nos ocuparemos de las relacionadas con el manejo de información.

Las aplicaciones principales de los ferromagnetos a la informática están ligadas al almacenamiento de datos, aprovechando el fenómeno de histéresis que lleva implícita la capacidad del material de mantener indefinidamente su estado, caracterizado por la dirección de su momento magnético.

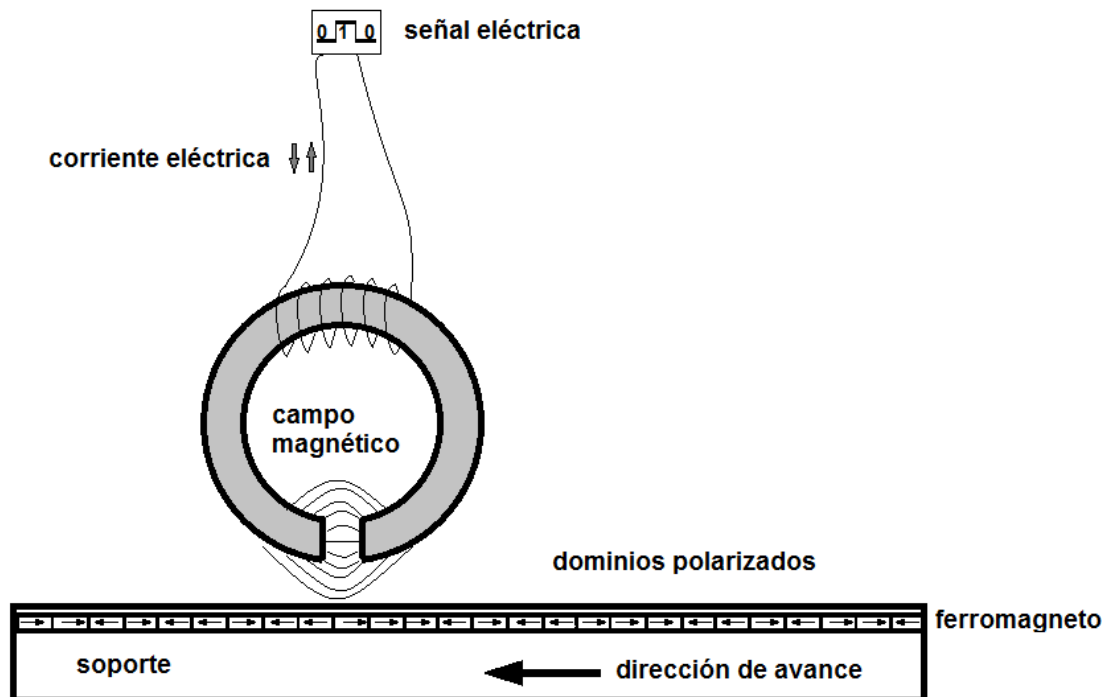
Cada material ferromagnético presenta una curva de histéresis característica, que es útil para determinar las ventajas relativas de un material para un uso determinado y es posible obtener materiales con cualquier curva deseada.

Como la señal que procesa el sistema es eléctrica y durante mucho tiempo resultó imposible mantener una carga sin alimentación exterior, (ver Unidad IV. Memorias Dram) la inducción electromagnética, trabajando en equipo con los ferromagnetos, brindó un medio muy eficaz para el almacenamiento no volátil y de alta densidad de la información, aunque en la actualidad compite con los cada vez más eficientes dispositivos de estado sólido, que ahora sí son capaces de mantener una carga eléctrica casi indefinidamente.

El mecanismo básico de operación consiste en transformar la señal eléctrica en una corriente que genere un campo magnético que, a su vez, quede atrapado en una pequeñísima porción de material ferromagnético.

El mecanismo de lectura puede ser esencialmente el mismo, ya que los pequeños imanes al desplazarse frente a la bobina, inducen una corriente cuyo sentido depende de la dirección de polarización, permitiendo reconstruir el dato original.

Este esquema básico se ha ido modificando detrás del objetivo de obtener más y más densidad superficial de datos, es decir, mayor capacidad de almacenamiento de los dispositivos, pero lo que no puede cambiarse es la necesidad del movimiento físico relativo entre las cabezas y el material magnético, lo que constituye un *hándicap* en contra frente a los métodos eléctricos.



El medio magnético de almacenamiento, en forma de finas agujas se deposita sobre un material soporte, (aluminio en el caso de los discos HDD) orientadas en la dirección de avance. El tamaño de las partículas es del mismo orden del dominio magnético, de tal forma que cada una es un monodominio con su momento magnético dirigido en una de las dos únicas direcciones posibles.

Los materiales vigentes en discos duros son aleaciones del tipo Co-Pt-Cr depositadas por pulverización catódica (*sputtering*) sobre el aluminio. Se consigue una estructura de grano (de unos 10 nm) con un núcleo fuertemente magnético, separado de sus vecinos por Cr no magnético, con lo que se reduce la interacción entre los campos de cada uno.

Disminuir el tamaño del grano trae aparejado la correspondiente disminución del tamaño efectivo de la cabeza grabadora y con ello, la intensidad del campo magnetizador, al mismo tiempo que dificulta la posterior lectura de los datos, por la debilidad del campo asociado. Simultáneamente aumenta la posibilidad de desmagnetización por agitación térmica. Se requiere que el material magnético tenga un B_r razonablemente alto para facilitar la lectura, pero un H_c relativamente bajo para poder cambiar la polarización.

Estos factores concurrentes y opuestos entre sí se expresan en el conocido “Trilema de la grabación magnética”, cuya superación se busca en cada innovación.

La aplicación de la tecnología TFI (Thin Inductive) a las cabezas de lectura/escritura (1979) y de los principios de la magnetoresistencia (1990) y magnetoresistencia gigante (GMR por en inglés) (1998 en adelante) a las cabezas de lectura, permitió grandes avances en

MAGNETORRESISTENCIA

Se llama así a la propiedad que presentan diversos materiales, de cambiar su resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético y es un fenómeno conocido desde hace más de 150 años. En realidad se trata de varios fenómenos distintos, sobre distintos tipos de materiales, con el resultado observable que se menciona, y que se manifiesta

capacidad de los discos. La densidad superficial pasó de 0,001 Gb/in² en 1970 a unos 400 Gb/in² en 2010, es decir aumentó por un factor de 400.000.

A partir de 2005 se hizo plenamente comercial la tecnología de grabación transversal (PMR) que permitió triplicar la densidad y se espera que, con el complemento de la todavía experimental grabación asistida por calor (HAMR), se pueda superar el Tb/in². En esta última técnica, se calienta mediante un láser la zona que va a ser magnetizada, bajando momentáneamente el campo coercitivo H_c , para facilitar la grabación. El área comprometida por el calentamiento es muy pequeña y rápidamente recupera su temperatura y propiedades magnéticas originales.

Una interesante derivación de la magnetorresistencia, en su variante TMR, es el desarrollo de las memorias MRAM, (ram magnética o magnetorresistiva) cuya *performance* en términos de velocidad y consumo hacen prever que puedan llegar a transformarse en la tecnología dominante para todos los tipos de memoria. La idea básica es detectar el estado de polarización de un ferromagneto, midiendo la resistencia eléctrica de la celda que lo contiene (y aquí ya no hay movimiento físico).

El desarrollo comenzó en la década del 90 y si no se expandió su uso mucho más, fue por las significativas mejoras en costo y rendimiento, que se produjeron en el campo de las DRAM y la tecnología FLASH, a las que podría reemplazar. En la actualidad existen varios dispositivos comerciales.

Capítulo 5

APÉNDICE. TECNOLOGÍA MAGNÉTICA Y ALMACENAMIENTO DE DATOS.

Como está dicho en el texto principal, el almacenamiento de datos por medios magnéticos aprovecha el fenómeno de inducción magnética y las propiedades de histéresis que presentan algunos materiales, para registrar, mantener indefinidamente, cambiar a voluntad y sensar la dirección de su momento magnético, la que se toma como unidad básica de información.

Excepto por el (comercialmente) fracasado intento de las memorias de burbuja magnética de los años 70, el magnetismo se utilizó exclusivamente en dispositivos de almacenamiento masivo de gran capacidad y tiempos de acceso relativamente largos (cintas y discos magnéticos), dejándole a los métodos puramente eléctricos la tarea de manejar los datos operativos del sistema, (memorias) que contienen menos información, pero donde la velocidad de trabajo es una variable crítica. Sin embargo, la frontera entre ambas aplicaciones es cada vez menos nítida y tiende a desaparecer con la evolución de los dispositivos empleados.

Un aspecto interesante de esta evolución, que tuvo un papel decisivo en el impresionante aumento de la capacidad de los discos rígidos, es el desarrollo de las diferentes tecnologías

empleadas en las cabezas de lectura/escritura, que pasaron de los que hoy parecen toscos mecanismos de bobinas de inducción con un núcleo ferromagnético, a los nanométricos ingenios que trabajan en el reino mecano-cuántico.

Los primeros permitieron la construcción de discos rígidos de hasta 100MB. Un significativo avance, hacia fines de los 70, significó el reemplazo de las primitivas bobinas por cabezas de escritura y lectura construidas litográficamente, en lo que se conoció como tecnología de película delgada (TFI), en las que el núcleo fue sustituido por una finísima capa de forma precisa de una aleación de buena performance ferromagnética, obteniéndose una cabeza muy pequeña, capaz de leer/escribir discos con mucha mayor densidad de datos, lo que permitió elevar la capacidad, a mediados de la década de los 90, hasta el rango de los 1000MB. Hasta aquí, sin cambiar los principios básicos de operación.

Pero el siguiente avance fue mucho más profundo. La inducción magnética desapareció de la etapa de lectura, siendo reemplazada por la magnetorresistencia, propiedad que presentan diversos materiales, de cambiar su resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético, fenómeno conocido desde hace más de 150 años. En realidad se trata, como veremos enseguida, de varios fenómenos distintos, que se presentan sobre distintos tipos de materiales y que han encontrado potentes aplicaciones en el almacenamiento de datos.

El primer escalón de este cambio fue en 1994, con la aplicación por IBM de la magnetorresistencia anisótropa (AMR), en la que las cabezas lectoras, construidas con aleación de hierro-níquel, detectan a través del cambio de su propia resistencia eléctrica, la dirección del campo magnético de los bits de información. Las cabezas AMR presentan una performance netamente superior a la de las TFI, siendo capaces de detectar campos más débiles y más densamente agrupados, con menos errores y a una distancia de vuelo superior. Como en esta tecnología, se separan las funciones de escritura, (que siguen realizándose con cabezas TFI) de las de lectura, cada una de estas funciones puede optimizarse al máximo, sin necesidad de acudir a soluciones de compromiso como ocurre cuando la misma cabeza debe realizar ambas. Las cabezas AMR son extremadamente pequeñas, pudiendo incluso ser menores que el ancho de la pista, lo que proporciona ventajas adicionales respecto de la precisión de la lectura. La aplicación de esta innovación llevó la capacidad de los discos rígidos, en unos pocos años hasta los 30 GB.

El Premio Nobel de Física 2007 fue otorgado a Albert Fert y Peter Grünberg quienes trabajando por separado, habían descubierto en los 80 un nuevo fenómeno descrito como “Magnetorresistencia Gigante” (GMR por sus siglas en inglés), que sirvió de base al desarrollo tecnológico de IBM, que hacia fines de 1997 presentó un nuevo tipo de cabezas de lectura que recientemente (2016), permitieron llevar la capacidad de los discos rígidos hasta los 10 TB . Con la aplicación de este nuevo fenómeno, la tecnología de almacenamiento de datos entró definitivamente en el terreno de la mecánica cuántica.

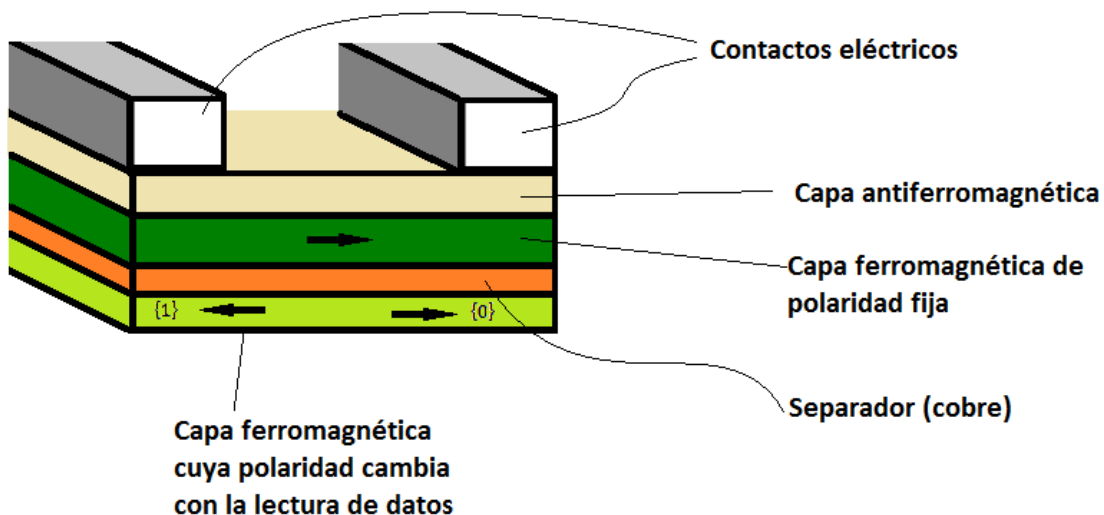
En efecto, hasta entonces la electrónica se basó en los efectos producidos por las diferentes concentraciones de electrones en los materiales y los consiguientes flujos de cargas originados, sin tener en cuenta una propiedad intrínseca de los electrones (y otras partículas) que la mecánica cuántica bautizó como “spin”, que estrictamente se refiere al momento angular intrínseco de la partícula y que, extrañamente para la mecánica clásica, sólo puede tener uno u otro de dos valores. Es una magnitud “cuantizada”. Solemos identificar a estos dos valores con los términos “arriba” (up) y “abajo” (down) y con su descubrimiento se completó hasta cuatro el número de parámetros cuánticos necesarios para describir al electrón en el átomo poli

electrónico. (Como se recordará, los otros números o parámetros cuánticos son el “principal”, el “acimutal” y el “magnético”).

Los materiales no magnéticos, por ejemplo el cobre empleado en los conductores, poseen igual cantidad de ambos spines, mientras que los materiales magnéticos presentan un desbalance de estas cantidades, lo cual constituye una variable adicional que es lo que se aprovecha en la “spintrónica” o electrónica de spin. Claro que para encontrar una aplicación práctica de esta cuestión, es necesario contar con un método de detección de los spines y esto es justamente lo que se logra con el fenómeno de GMR. Veamos cómo se hace.

Como vimos en el texto principal, la información contenida en el material magnético del disco rígido, consiste en una de las dos posibles orientaciones del campo, que es lo que debe sensar la cabeza lectora. El dispositivo desarrollado por IBM para este fin es la “válvula de spin” (spin valve) que se construye (y éste es un dato clave) por el mismo método que los circuitos integrados y las cabezas TFI, es decir con la tecnología de “capa delgada”. En este caso, se superponen cuatro capas de diferentes materiales, como se muestra en la figura:

La capa ferromagnética inferior, hecha de una aleación de Ni-Fe, es magnéticamente blanda, o sea que cambia fácilmente de estado y es la que está expuesta al campo magnético cambiante que contiene la información. La capa separadora está hecha de un material conductor no magnético (por ejemplo, cobre), que la aísla magnéticamente de la capa siguiente. Ésta (de cobalto) se encuentra polarizada con una orientación del campo que no cambia, -sólo puede hacerlo cuando es expuesta a campos muy intensos-, gracias a un fenómeno (polarización de intercambio) en el que interviene el material antiferromagnético (Fe-Mn) de la capa superior.



Válvula de spin: La capa ferromagnética inferior cambia fácilmente de estado y es la que está expuesta al campo magnético cambiante que contiene la información. La capa separadora (cobre), la aísla magnéticamente de la capa siguiente. Ésta se encuentra polarizada con una orientación del campo que no cambia. Cuando el bit leído corresponde a una orientación del campo paralela a la de la capa de polaridad fija, la resistencia entre los contactos eléctricos resulta menor que si es antiparalela.

Cuando el bit leído corresponde a una orientación del campo paralela a la de la capa de polaridad fija, la resistencia entre los contactos eléctricos resulta menor que si es antiparalela y esto es debido a la diferente cantidad de electrones “spin down” y “spin up” presentes en los

materiales diferentemente polarizados. (De allí el nombre de “válvula de spin” del dispositivo). De esta manera, el circuito eléctrico presenta dos estados (de alta y baja resistencia) que constituyen la información.

La misma idea de la válvula de spin se pone en juego para almacenar un dato, ya no sólo para leerlo, dando origen a un nuevo tipo de memoria, la RAM magnética, (MRAM). En este caso, la capa separadora es no conductora y es atravesada por la corriente por el conocido proceso cuántico “efecto túnel”, en un dispositivo llamado “unión túnel-magnética” (MTJ por sus siglas en inglés). Otra vez, la resistencia efectiva que presenta el dispositivo, depende de las polaridades relativas de ambas capas ferromagnéticas, dando origen a dos estados que se pueden cambiar y sensar fácilmente.

Al combinar un alto nivel de integración, alta velocidad de operación, no volatilidad, baja tensión de trabajo y duración indefinida, las MRAM presentan las mejores propiedades de las DRAM, SRAM, FLASH y FRAM, pero obviando algunos de sus puntos débiles, por lo que ha sido propuesta como la “memoria universal”. El desarrollo comenzó en la década del 90 y si no se expandió su uso mucho más, fue por las significativas mejoras en costo y rendimiento, que se produjeron en el campo de las DRAM y la tecnología FLASH, a las que podría reemplazar. En la actualidad existen varios dispositivos comerciales.

Otra interesante propiedad magnetorresistiva, conocida desde hace tiempo y que ha despertado renovado interés de los tecnólogos, es la que presentan diferentes compuestos conocidos como perovskitas. La variación de la resistencia eléctrica, con la aplicación de un campo magnético intenso, alcanza valores del orden de 10^5 , por lo que ha recibido el nombre de “magnetorresistencia colosal” (CMR) y se investigan las posibilidades de aplicación en el almacenamiento de datos, tanto en las cabezas de lectura, como en las memorias magnéticas.

Capítulo 6

UNIDAD VI. MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Introducción

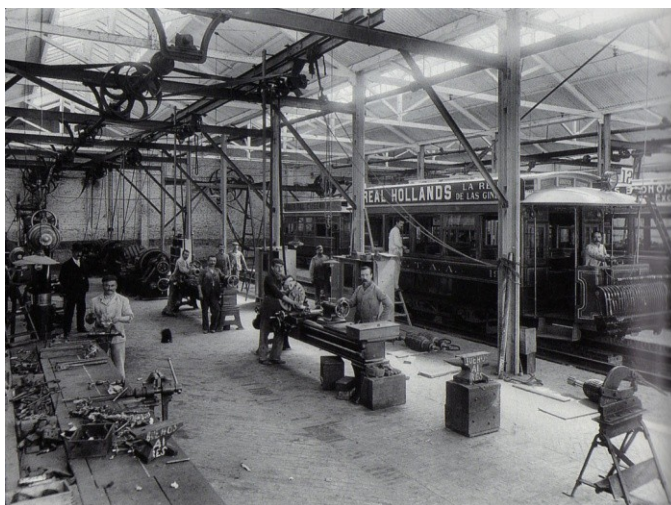


Figura 6.1. Talleres de una empresa de tranvías en Buenos Aires, ca. 1900. Se observan los ejes y poleas que transmiten la energía de la caldera a las máquinas-herramienta. Colección Archivo General de la Nación.

La electricidad tiene dos grandes usos: uno es la transmisión de energía y el otro el procesamiento de la información. Del último nos ocuparemos en la segunda parte de este curso, pero con respecto al primero, se advierte que ha resultado tan útil y eficaz que le dio forma característica al paisaje de nuestra civilización. Antes de su generalización y cuando ya el hombre manejaba importantes cantidades de energía para la producción y el transporte, lo común era transformar la energía térmica en mecánica, (la máquina

de vapor), cosa que había que realizar en el lugar y el momento de su utilización. Esta situación explica la locomotora a vapor y los complicados sistemas de ejes y poleas que llevaban la capacidad de trabajo desde la caldera a, por ejemplo, los telares mecánicos.

Hoy la energía llega a todo tipo de máquinas y dispositivos, en forma segura, limpia y con alto rendimiento, desde donde abunda (centrales térmicas, nucleares o hidroeléctricas) hasta donde es necesaria, conducida por cables, que a veces ni siquiera se ven, a través de miles de kilómetros.

Se llama máquinas eléctricas a los dispositivos que, utilizando los principios de la inducción electromagnética, -es decir el juego de transformaciones que ocurre entre campos eléctricos y magnéticos-, participan de este proceso de generación, transpo

Se clasifican convencionalmente en:



Figura 6.2. Línea de montaje de industria electrónica en T. del Fuego. La energía llega a cada puesto de trabajo, conducida por cables subterráneos. Infobae 2013

GENERADORES	Transforman energía mecánica en eléctrica.
MOTORES	Transforman energía eléctrica en mecánica.
TRANSFORMADORES	Acondicionan la energía eléctrica para su transmisión o utilización.

Tabla 6.1. Clasificación de máquinas eléctricas.

En la Unidad II se había corriente alterna, la que Después de haber cono lo que allí se decía, ya q provocarían complicada Comenzaremos nuestro interacciones.

mediante la ortantes. !l alcance de n circuito tas

La Corriente Alterr

Valor Eficaz

Como dijimos en un tema anterior, la corriente eléctrica que se distribuye por redes, para su uso doméstico e industrial toma la forma de corriente alterna. Su característica es que tanto la intensidad como la tensión varían en el tiempo en forma aproximadamente senoidal, teniendo

la mitad del tiempo una polaridad y la otra mitad la polaridad inversa. Los valores de ambas variables, como función del tiempo, pueden expresarse:

$$I(t) = I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6.1)$$

Y

$$V(t) = V_{\max} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi) \quad (6.2)$$

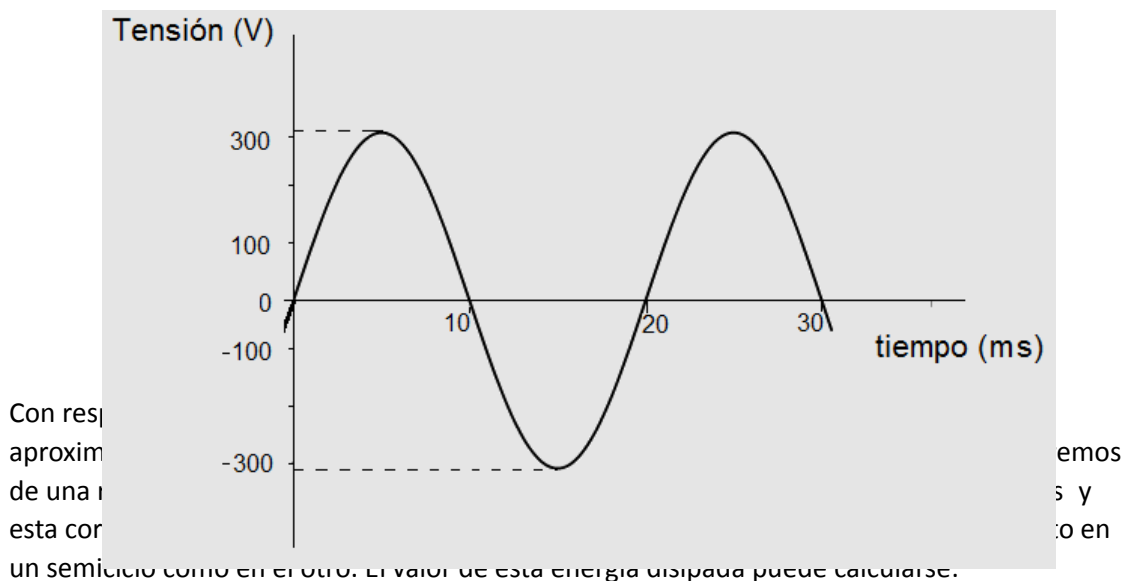
Donde la *pulsación* $\omega = 2\pi f$, es una expresión de la frecuencia, cómoda para algunos cálculos y φ es el ángulo de fase.

En el gráfico de la figura 6.3, se ilustra la relación entre la tensión eléctrica, respecto de un valor fijo y el tiempo, (en este ejemplo $\varphi = 0$; $T = 1/f = 20\text{ms}$) para la corriente eléctrica que disponemos en cualquier toma-corriente. ¿Por qué se caracteriza esta corriente como de 220V / 50 Hz?

El segundo dato se refiere a la frecuencia f e informa sobre el número de veces que se realiza un ciclo completo en un segundo.

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ ciclo/segundo}$$

Puesto que demora 20 ms en realizar un ciclo, la respuesta es inmediata.



$$L = \int P(t) \cdot dt = \int I(t) \cdot V(t) \cdot dt \quad (6.3)$$

Figura 6.3. Tensión vs. tiempo en la red pública domiciliaria argentina.

O, utilizando la ec 2.12 y para un período completo T :

$$L = R \int_0^T I^2 \cdot dt = R \cdot I_{\max}^2 \int_0^T \text{sen}^2(\omega \cdot t) dt \quad (6.4)$$

Resolviendo la integral, se obtiene:

$$L = T \cdot \frac{I_{max}^2 \cdot R}{2} \quad (6.5)$$

Y entonces, la potencia media en un ciclo:

$$P = \frac{I_{max}^2 \cdot R}{2} \quad (6.6)$$

Similarmente:

$$P = \frac{V_{max}^2}{2R} \quad (6.7)$$

Recordando la definición de valor eficaz expuesta en la Unidad II:

Se llama valor eficaz de las magnitudes intensidad y tensión de una corriente alterna, a los valores de corriente continua que disiparían la misma potencia

$$I_e^2 \cdot R = \frac{I_{max}^2 \cdot R}{2} \quad (6.8)$$

Dado que:

$$I_e = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (6.9)$$

Y de igual forma:

$$V_e = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (6.10)$$

Donde los subíndices “max” y “e” identifican valores máximos y eficaces, respectivamente, siendo 220V el *valor eficaz* de la tensión (V_e) suministrada para uso domiciliario. En el caso que estamos analizando, (conexión a resistencia) *tanto los valores eficaces como los máximos* de V e I , están relacionados entre sí y con la resistencia por la Ley de Ohm. Pero como veremos en seguida, la situación se complica con la presencia de otros componentes.

Ejercicio 6.1

En algunos países la tensión domiciliar de red es 110 V (valor eficaz).

- a) ¿Cuál es la tensión de pico en esos países y en el nuestro?
- b) ¿Cuál será la relación óptima entre los diámetros de los conductores que se utilizan y los nuestros, para que la transmisión de la energía se produzca con la misma eficacia?

Impedancia

Ya que, según vimos, siempre hay un campo magnético alrededor de una corriente eléctrica, ocurrirá si ésta es del tipo alterna, -como la que circula por las redes de distribución-, que el campo magnético asociado es también variable. Pero puesto que los campos magnéticos variables inducen *fem* (*fuerza electromotriz*), ¿qué pasará entonces? Si el circuito posee un valor considerable de autoinducción, (Unidad IV), la interacción del campo magnético variable con la corriente será importante y los resultados serán notables.

Por otro lado, si en el circuito existen condensadores, (Unidad III), la mitad del tiempo se estarán cargando y la otra mitad, lo contrario. Si las capacidades son importantes, otra vez tendremos resultados notables.

Podemos englobar la influencia de la presencia de capacidades e inductancias en un circuito CA, en una expresión que podemos considerar como una generalización de la ley de Ohm.

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{Z} \quad (6.11)$$

Relación también válida, por supuesto, para los valores eficaces de las magnitudes. Donde Z es la impedancia, que podemos considerar como la “resistencia de alterna”, en cuyo valor intervienen la resistencia óhmica, la *reactancia inductiva* X_L y la *reactancia capacitiva* X_C

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (7.12)$$

Siendo:

$$X_L = \omega \cdot L \quad (7.13)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (7.14)$$

La reactancia total X de un circuito será:

$$X = X_L - X_C \quad (7.15)$$

Obsérvese que tanto L (ec. 4.23) como C , (ec. 3.2) dependen de características constructivas del componente, pero su efecto, la reactancia, varía con la frecuencia y lo hace en forma inversa en un caso y en el otro.

Es interesante notar que los efectos capacitivos e inductivos, a diferencia de los resistivos, no provocan la transformación de la energía eléctrica en térmica o cualquier otro proceso irreversible. La energía utilizada en un semiciclo, en crear los campos magnéticos o eléctricos, es “devuelta” en el semiciclo siguiente. En cambio, producen un efecto inesperado: cambian la fase entre la tensión y la corriente. Es decir que, en un instante dado, la tensión puede estar en 0, por ejemplo, y la intensidad tener cualquier valor menor que la I_{max} . Estos desfases son provocados, justamente, por la presencia de inductancias y capacidades.

Si representemos la tensión como una función sinusoidal del tiempo, como en la ec. 7.2:

La intensidad de corriente vendrá dada por:

$$I = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (7.16)$$

La diferencia de fase φ entre ambas viene dada por:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (7.17)$$

El efecto de una reactancia capacitiva pura es adelantar 90° la fase de la intensidad respecto de la tensión, mientras que una reactancia inductiva pura, provoca el efecto contrario.

Las relaciones descritas arriba se deducen fácilmente, tratando a la impedancia como un número complejo en el que la resistencia es la parte real y las reactancias la parte imaginaria. En el gráfico de la figura 6.4 se aplica esta idea y quedan claramente expuestas las relaciones mencionadas.

Figura 6.4. Diagrama de Fresnel. En el plano complejo, sobre el eje de ordenadas (parte imaginaria de Z) se representan las reactancias capacitivas e inductivas con signos opuestos y sobre las abscisas, la resistencia.. Así la ec (7.12) es una consecuencia del Teorema de Pitágoras.

Ejercicio 6.2

Un circuito de corriente alterna se encuentra integrado por una $R = 20 \, \Omega$, una bobina de $0,5 \, \text{H}$ de y un condensador de $10 \, \mu\text{F}$. Se conecta a una fuente de tensión eficaz de $220 \, \text{V}$ y $50 \, \text{Hz}$ de frecuencia. Calcular:

- La impedancia del circuito
- La diferencia de fase φ
- Resolver gráficamente.

Factor de potencia

Una importante consecuencia técnico-económica se deriva de lo anterior. En efecto, la no concordancia en fase de tensión y corriente causa que la potencia real disponible sea menor que la que expresa el producto de tensión y corriente eficaces, como podría esperarse.

En la figura 6.5 (a) se representa la evolución de los valores de I, V y P , a lo largo de un ciclo, cuando no hay diferencias de fase, es decir, en un circuito puramente resistivo. Se observa que

la potencia es siempre positiva, lo que significa que se transfiere energía del circuito a los dispositivos conectados, ya que la intensidad de corriente tiene la misma polaridad que la diferencia de potencial. El área grisada corresponde al valor de la integral de $P \cdot dt$, o sea la energía total transferida.

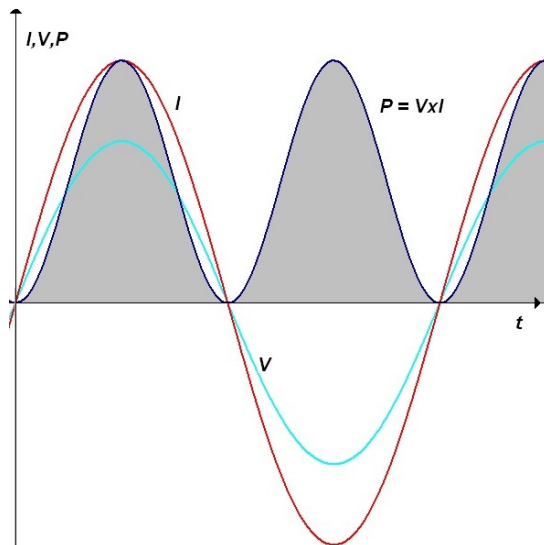


Figura 6.5 (a). Intensidad, tensión y potencia instantáneas en función del tiempo en un circuito puramente resistivo. .

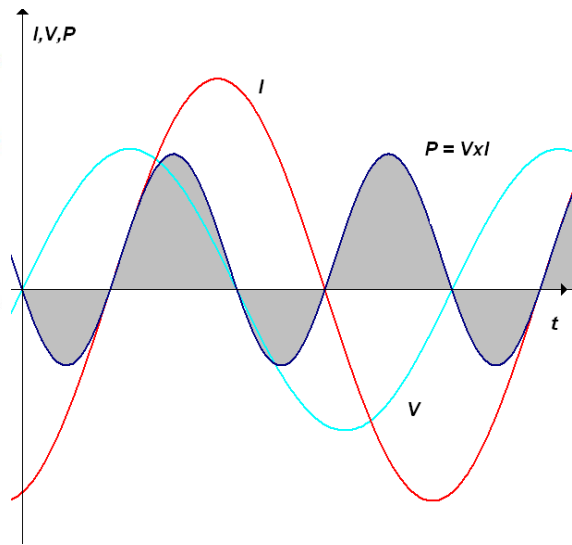


Figura 6.5.(b) Intensidad, tensión y potencia instantáneas en función del tiempo en un circuito con reactancia. .

En la figura 6.5 (b), se representa lo mismo, pero en el caso de que exista diferencia de fase entre corriente y tensión, es decir que haya efectos reactivos.

Aquí se puede apreciar que parte del flujo de energía (los valores negativos de potencia) va de los dispositivos hacia la línea de alimentación. Esta energía no es utilizable por la carga, lo que significa que para obtener la misma energía, es necesario hacer circular una mayor intensidad de corriente.

La relación entre la potencia real P , -que se mide en W-, y la potencia aparente S , (o sea el producto de los valores eficaces de tensión y corriente), que se mide en V x A, es igual al coseno de la diferencia de fase definida en la ec. (6.17). Se la conoce con el nombre de *factor de potencia* o *coseno ϕ* (f.d.p. o $\cos\phi$) y expresa la fracción de la energía suministrada que es efectivamente utilizada.

$$\frac{P}{S} = \cos\phi = \text{factor de potencia} \quad (6.18)$$

Un bajo factor de potencia significa inconvenientes, tanto para el proveedor como para el consumidor de energía eléctrica. Las compañías de electricidad se ven perjudicadas pues deben dimensionar sus equipos e instalaciones para una corriente mayor que la realmente necesaria y aumentan sus pérdidas por transmisión. El usuario, por su parte, tiene los mismos problemas, pero además, paga por energía que no utiliza y está expuesto a deficiencias

Una PC antigua puede tener un f.d.p. tan bajo como 0,6. Grandes servidores actuales, con consumos de 500W o más, suelen estar equipados con fuentes del tipo FPC, que lo elevan prácticamente a 1.

en el suministro (caídas de tensión), mal funcionamiento de elementos de control (fusibles, térmicas), además de penalizaciones de la compañía.

Dado que lo común es un exceso de carga inductiva, el factor de potencia se corrige, en general, agregando capacitores. La medición, el cálculo del corrector y la instalación del mismo, debería ser hecha por un experto o personal idóneo. En toda instalación eléctrica importante, el factor de potencia es un ítem a considerar y los centros de cómputo no están (o no deberían estar) exentos. La iluminación fluorescente y las mismas computadoras son fuente de disminución del factor de potencia.

Ejercicio 6.3

Explique y justifique claramente por qué no se transmite energía del circuito a la carga (dispositivos conectados) si las polaridades de tensión y corriente no coinciden.

Transformadores

Como sabemos, las variaciones de la intensidad de la corriente que circula por una bobina, originan variaciones del flujo magnético que pueden inducir *fem* (fuerzas electro motriz) en otros circuitos vecinos. La ley de Faraday establece que el valor de la *fem* inducida en una espira:

$$\Delta V = \frac{-d}{dt} \quad (7.19)$$

Pero, si se trata de una bobina de n espiras, este valor se multiplicará n veces:

$$\Delta V = -n \cdot \frac{d}{dt} \quad (7.20)$$

Esto se aprovecha para la construcción de transformadores, dispositivos que son alimentados con una tensión de CA y entregan otra, también alterna.

Si dos bobinas con N_1 y N_2 espiras respectivamente, se disponen muy próximas entre sí, aunque sin conexión eléctrica entre ellas, de tal forma que el flujo magnético originado por cualquiera, atraviese en la mayor proporción posible la otra¹², se cumplen aproximadamente las relaciones de las ecuaciones (7.21) y (7.22):

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \quad (7.21)$$

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$$

O sea que se puede reducir o aumentar a voluntad la tensión de un circuito mediante un dispositivo sin piezas móviles y de gran rendimiento. De ambas ecuaciones se ve que, en todo momento, se cumple que la potencia en ambos circuitos es la misma, produciéndose una transferencia de energía de un circuito al otro.

¹² $1C=1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ Esto se consigue bobinando una sobre la otra, o las dos sobre la misma armadura de material ferromagnético.

El circuito que recibe la alimentación externa se denomina *primario*, en tanto que el circuito sobre el cual se induce la *fem*, recibe el nombre de *secundario*. Dado que en estos dispositivos el proceso de transferencia de energía es reversible, los papeles de ambos pueden intercambiarse.

Por supuesto, que estas consideraciones se refieren a un transformador ideal, que debería

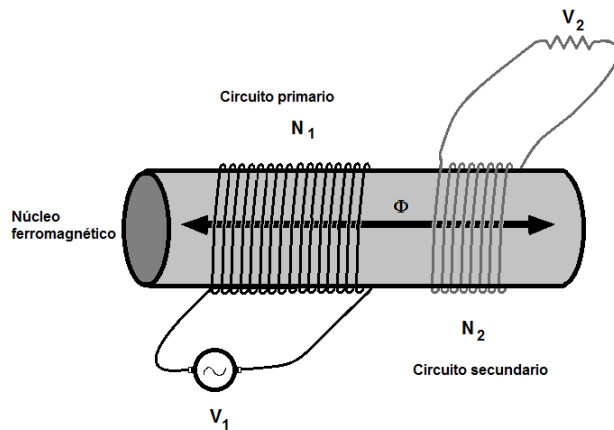


Figura 6.6 Esquema de un transformador. Los circuitos primario y secundario no están conectados eléctricamente, pero comparten un flujo magnético.

cumplir con no presentar resistencia óhmica en el primario, y que efectivamente todo el flujo magnético atravesase ambas bobinas. En la práctica se producen pérdidas por disipación por efecto Joule, por el ciclo de histéresis del núcleo y porque parte del campo magnético, está fuera de las bobinas. Los transformadores pequeños, de uso común en fuentes de alimentación domésticas, tienen rendimientos del 90% y más. Los grandes dispositivos utilizados en las redes de transmisión pueden llegar al 99%.

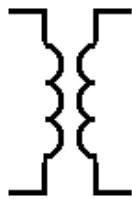


Figura 6.7 Símbolo genérico del transformador.

La importancia de contar con un dispositivo como el transformador, se hace evidente al recordar que utilizamos la corriente eléctrica para transportar energía a lo largo de miles de kilómetros, desde donde es fácil generarla (Atucha, Salto Grande, El Chocón) hasta donde es necesaria y las consideraciones que hicimos sobre el transporte de energía eléctrica en la Unidad II.

El símbolo genérico del transformador, (figura 6.7) muestra los circuitos primario y secundario, con sus terminales. Se utilizan otros símbolos para tipos específicos.

Ejercicio 6.4

Analice y explique que sucedería en cada uno de los siguientes casos:

- se conecta el primario de un transformador a corriente continua?
- se corta el bobinado secundario en algún punto interior?
- se cortocircuita el secundario?
- en un transformador 220 a 110 V se conecta el primario a 110 V?
- en el mismo transformador se conecta el secundario a 220 V?

Relés (relays o relevadores)

Forzando un poco la definición de máquina eléctrica, dada más arriba, podemos incluir a estos dispositivos, que encuentran importantes aplicaciones en robótica.

Son interruptores accionados eléctricamente, -es decir que se obtiene un movimiento a partir de energía eléctrica-, aunque su objetivo no es transformarla en energía mecánica como en los motores, sino conseguir pequeños movimientos que sirven para controlar otros circuitos de mayor potencia. Básicamente consisten en una pieza ferromagnética que es desplazada por el campo magnético creado por un electroimán. Al moverse, abre o cierra el contacto de otro circuito.

Las primitivas computadoras digitales operaban con relés, ya que el dispositivo, con sus dos estados, puede almacenar un bit de información.

Pueden ser del tipo “normalmente abierto” o “normalmente cerrado”, según sea la posición del contacto, cuando la bobina no está excitada. El primer caso se muestra en la figura 6.7. La llave de control A, excita la bobina con núcleo ferromagnético B, que atrae el contacto móvil C. De esta forma, el circuito de alta potencia, que alimenta la carga D, queda activado.

Sin embargo, el dispositivo más empleado actualmente en robots de todo tipo, es el llamado relé de estado sólido, que opera bajo otros principios y cuyo estudio podremos abordar en la segunda parte de este curso.

Generadores Y Motores

En la Unidad IV se expusieron los principios de funcionamiento de ambos dispositivos, basados en las leyes de Faraday y de Lorentz, que ocupan un lugar importantísimo en nuestra sociedad. Prácticamente la totalidad de la energía eléctrica que se distribuye por la redes en todo el

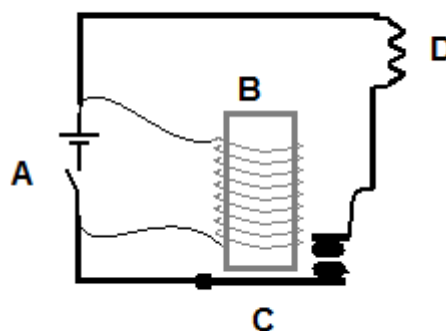


Figura 6.8 Esquema de un relé del tipo “normalmente abierto”

mundo, se produce con los primeros y algo así como un 60% se consume en motores.

Aunque existen motores lineales, donde la energía mecánica se aplica a un movimiento rectilíneo, lo más común en ambos es el movimiento rotatorio. Básicamente consisten en un *rotor* que contiene un bobinado, que gira dentro de un campo magnético creado por un *estator*, fijo a la carcasa, que puede ser en base a imanes permanentes o inducido por una corriente eléctrica en otro bobinado, con o sin núcleo ferromagnético.

Existe una enorme variedad de tipos de estas máquinas, adaptados a las distintas necesidades y situaciones. Una primera clasificación podría ser según el tipo de corriente:

Corriente continua (CC o DC)	Motores	Especialmente aptos para grandes potencias, con facilidad de control de la velocidad, como en vehículos y trenes de laminación. Los motores paso a paso permiten un control preciso de movimientos.
	Generadores (Dínamos)	Excepto en algunas aplicaciones puntuales, como generación a bajos voltajes, han sido desplazados por los alternadores, seguidos de una etapa rectificadora de estado sólido.
Corriente alterna (CA o AC)	Motores	Universales. Hay muchos tipos diferentes para numerosas aplicaciones domésticas e industriales.
	Generadores (Alternadores)	Uso universal en la generación de energía que se transmite por redes y en todo tipo de aplicaciones de alta y baja potencia.

Tabla 6.2. Clasificación de motores/generadores.

En la figura 6.8 se muestra un esquema simplificado de un motor de corriente continua junto con una breve explicación de su funcionamiento.

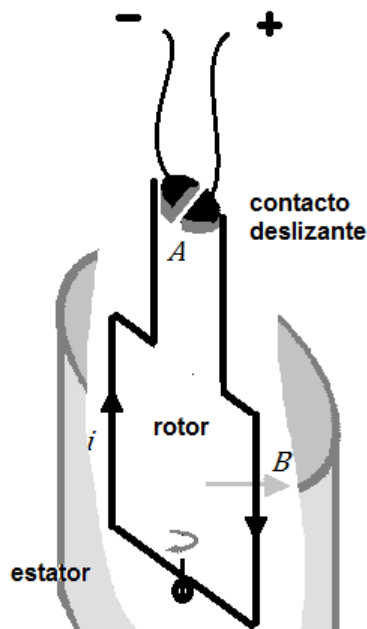


Figura 6.9 Esquema de un motor de corriente continua. Justo cuando el rotor alcanza la posición de equilibrio, alineando su momento magnético con el campo B, creado por el estator, el contacto deslizante invierte el sentido de la corriente, promoviendo otro medio giro. La situación se reproduce cada 180° de giro del rotor, generándose una rotación continua. Si el estator consiste en un imán permanente, el dispositivo es reversible, pudiendo funcionar como generador. En ese caso, el movimiento del rotor provoca una variación del flujo magnético que lo atraviesa, generándose una diferencia de potencial, como establece la ley de Faraday. La energía mecánica entregada se transforma en energía eléctrica en forma de una corriente que, debido a los contactos deslizantes, tiene siempre la misma polaridad.

Por su parte, los motores de corriente alterna no necesitan del conmutador basado en contactos deslizantes, ya que el estator crea un campo magnético giratorio, que impulsa al rotor. Por esta razón, resultan más sencillos y más económicos de construir y son los más utilizados en todo tipo de aplicaciones. La desventaja que presentan frente a los de CC es la

mayor dificultad de variar su velocidad, que en éstos se logra sencillamente controlando la tensión de alimentación, en tanto que los de CA requieren una variación –más dificultosa de generar- de la frecuencia. Es por eso que encontraremos preferentemente a los primeros en ingenios que requieran gran potencia y régimen variable, como los vehículos eléctricos o híbridos, grandes trenes de laminación, etc.

Motores paso a paso.

Los motores descritos hasta aquí son los más comunes en centenares de aplicaciones domésticas e industriales. Sin embargo, presentan serias limitaciones cuando el objetivo es producir pequeños movimientos lineales o circulares, con buena precisión, debido fundamentalmente a la inercia asociada al rotor, que ocasiona velocidades variables durante el arranque y parada, que resultan difíciles o imposibles de controlar.

El uso de reductores de velocidad y cremalleras podría ayudar en algunos casos, pero al costo de complicar grandemente el mecanismo y aumentar más aún la inercia y los problemas de fricción. Imaginar lo que sería intentar comandar los veloces y necesariamente precisos movimientos de una cabeza de lecto-escritura de un disco magnético, alcanza para ilustrar estas dificultades. Los motores paso a paso (*stepping motors* en inglés) y, en algunos casos, los servomotores, proveen soluciones adecuadas a este tipo de situaciones, frecuente en robótica.

Lo que hace un motor paso a paso es convertir un pulso eléctrico en un desplazamiento angular discreto, definido por la “resolución del motor”. Una resolución de 90° implica que hay 4 pasos en una vuelta y una de 0,72°, que se necesitan 500 para completar una revolución, siendo estos dos valores, los extremos que se encuentran en los productos comerciales.

Los motores paso a paso pueden ser:

- a) Imán permanente. Son los más utilizados en robótica y pueden ser, a su vez, unipolares o bipolares. Diremos algo más sobre ellos más abajo.
- b) Reluctancia¹³ variable. El rotor es una pieza dentada de un ferromagnético “blando” (hierro dulce), que por acción del campo magnético creado por el estator, gira hasta alcanzar su posición de equilibrio, en la que el flujo magnético que la atraviesa es máximo.
- c) Híbridos. Combinan las mejores ventajas de los anteriores. Son de uso industrial muy extendido.

Nos ocuparemos brevemente de los del tipo a). En el rotor van aplicados imanes permanentes que crean zonas con polaridad opuesta y en el estator hay un cierto número de bobinas excitadoras. En la figura se representa un motor con 3 pares de polos norte-sur y dos bobinas

Figura 6.10. Esquema general de un motor paso a paso de imán permanente. Hay tres bobinas en el estator, cada una con un terminal de salida. Las bobinas se conectan a los polos del imán permanente, cambiando la polaridad de los polos. La disposición es la misma para los otros dos casos, aunque cambia el número de bobinas en el primer caso y 4 en el segundo.

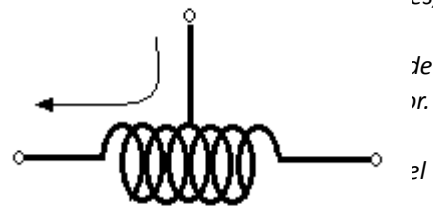


Figura 6.11 Los motores PAP unipolares, utilizan sólo la mitad de sus circuitos simultáneamente, por lo que tienen una peor relación torque/peso.

¹³ $1C = 1A \times 1s$ $I = \Delta V \times \sigma$ L_i
magnético a la transmisión del flujo magnético.

excitadoras. Corresponde a un motor con una resolución de 30° . Mayor resolución implica un mayor número de polos, aunque puede lograrse el mismo resultado y un funcionamiento más suave, mediante la técnica de “microstepping”, utilizando modulación por ancho de pulsos (PWM) con la que se consigue transferir gradualmente corriente de una espira a otra.

Los bobinados pueden ser del tipo “unipolar”, en el que existe un punto medio de la bobina, generalmente conectado a un potencial alto. Alternando la conexión a tierra de uno u otro extremo, se invierte la polaridad del campo magnético generado. De esta manera, nunca se está utilizando todo el bobinado en forma simultánea.

El tipo “bipolar”, por el contrario, tiene un circuito más simple, sin salida en los puntos medios, que es recorrido por la corriente en una u otra dirección, lo que le confiere una mejor relación torque/peso. El costo de esta mayor sencillez constructiva se paga con un circuito de control más complicado para direccionar convenientemente la corriente.

Resumen

Las máquinas eléctricas son dispositivos que, utilizando los principios de la inducción electromagnética, participan en la generación, transporte y utilización de la energía eléctrica.

Pueden ser: generadores (transforman energía mecánica en eléctrica), motores (realizan el proceso inverso) o transformadores (acondicionan la energía para su uso).

La energía se transporta y utiliza mayoritariamente en forma de corriente alterna, que se caracteriza por sus *valores eficaces*, (valores de CC que producen el mismo efecto energético) y su *frecuencia*. La *impedancia* de un circuito es un parámetro equivalente a la resistencia de la ley de Ohm, que relaciona la tensión alterna con la corriente que circula, que tiene en cuenta fenómenos capacitivos e inductivos y depende de la frecuencia.

Cuando los fenómenos mencionados están presentes, la tensión y la corriente pueden no estar *en fase*, lo que origina una merma en la posibilidad de utilizar toda la potencia generada y transportada. El *factor de potencia* es el parámetro que cuantifica esta merma.

Los *transformadores* son dispositivos clave de la tecnología eléctrica en uso. Consisten en dos circuitos, conectados magnéticamente, en los que la tensión de entrada tiene una relación fija con la tensión de salida, jugando un papel fundamental en el transporte de grandes cantidades de energía a través de grandes distancias.

Los *motores de CA* son los más utilizados por su menor costo, especialmente en aplicaciones de todos los rangos de potencia a régimen constante. Los de CC son más aptos para grandes potencias a régimen variable.

Los relés y motores paso a paso son dispositivos de amplia aplicación en robótica. Los primeros como conmutadores/interruptores accionados eléctricamente y los segundos para obtener pequeños movimientos de precisión, objetivo que logran convirtiendo un pulso eléctrico en un movimiento angular discreto.

Capítulo 7

5. INTERACCIONES DE LA MATERIA CON EL CAMPO ELÉCTRICO

5.1 Conductores y aislantes

Hay una clase de materiales, compuesta por todos los metales y algunos otros, que permite el tránsito de cargas eléctricas con gran facilidad, las que se distribuyen por todo el cuerpo hasta alcanzar muy rápidamente el equilibrio. A esta clase se los llama **conductores**.

Otro grupo, de comportamiento claramente opuesto al anterior, permite encontrar cargas localizadas en distintas partes. Los llamamos **aislantes** o **dieléctricos**.

Sin embargo, el límite entre ambas clases no es en absoluto nítido y es posible observar comportamientos intermedios en muchos materiales. Algunos **semiconductores** juegan un papel fundamental en la tecnología vigente y más adelante nos ocuparemos de ellos. Para nuestro propósito actual, centraremos la atención en los dos primeros.

En los sólidos, los electrones son las únicas partículas que pueden moverse, y así conducir la electricidad, sin alterar la estructura del cuerpo.

Un modelo que explique todos estos hechos puede ser que electrones de los átomos de los materiales sólidos conductores puedan liberarse fácilmente de la ligadura a su núcleo y moverse libremente por todo el material, mientras que en los aislantes están “atrapados” tan fuertemente por sus núcleos que no les permiten liberarse.

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 si se funden o si se disuelven. En nuestro análisis nos centraremos en el estudio del estado sólido. Veamos qué sucede cuando colocamos distintos sólidos dentro de un campo eléctrico.

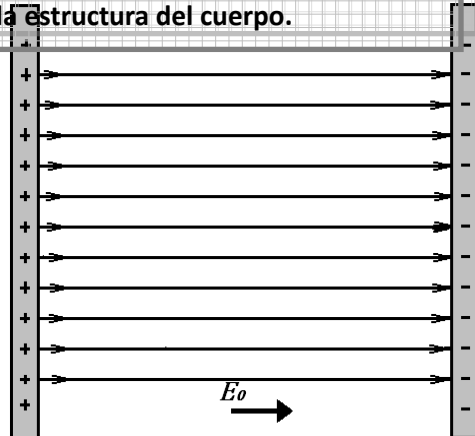


Figura 1.9. Entre las placas de un capacitor y lejos de los bordes puede obtenerse un campo intenso y uniforme.

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 *capacitor* y nos ocuparemos detalladamente de él más adelante, pues constituye un componente de gran importancia de los circuitos eléctricos de todo tipo.

La representación de las líneas de fuerza, separadas a la misma distancia una de la otra, indica 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.

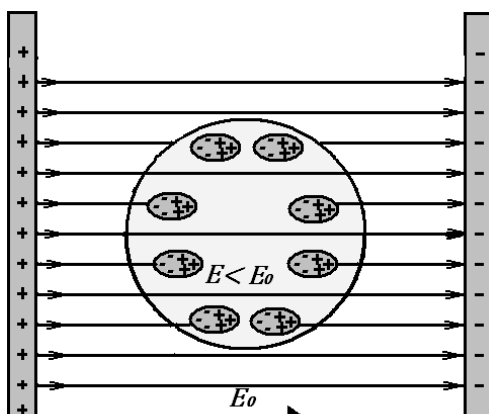


Figura 1.10. Debido a la polarización, el campo eléctrico dentro de un aislante resulta

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

Recordemos que en los átomos y moléculas que formen el cuerpo, existen cargas eléctricas de ambos signos que se neutralizan entre sí. Sin embargo, al estar en un campo eléctrico, estas cargas sufrirán fuerzas que tenderán a desplazarlas.

Si el cuerpo es un dieléctrico, las cargas en su interior no pueden desplazarse con libertad, aunque habrá un acomodamiento de las mismas, llamado *polarización*, por lo que, 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 dieléctrico expuesto a un campo eléctrico exterior, el campo interior resulta debilitado.

Distinto es el comportamiento si el cuerpo es un material conductor. Las cargas se desplazarán libremente, empujadas por el campo eléctrico, hasta lograr que en su interior el campo eléctrico se anule completamente.

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 el dibujo se trata de representar esta situación

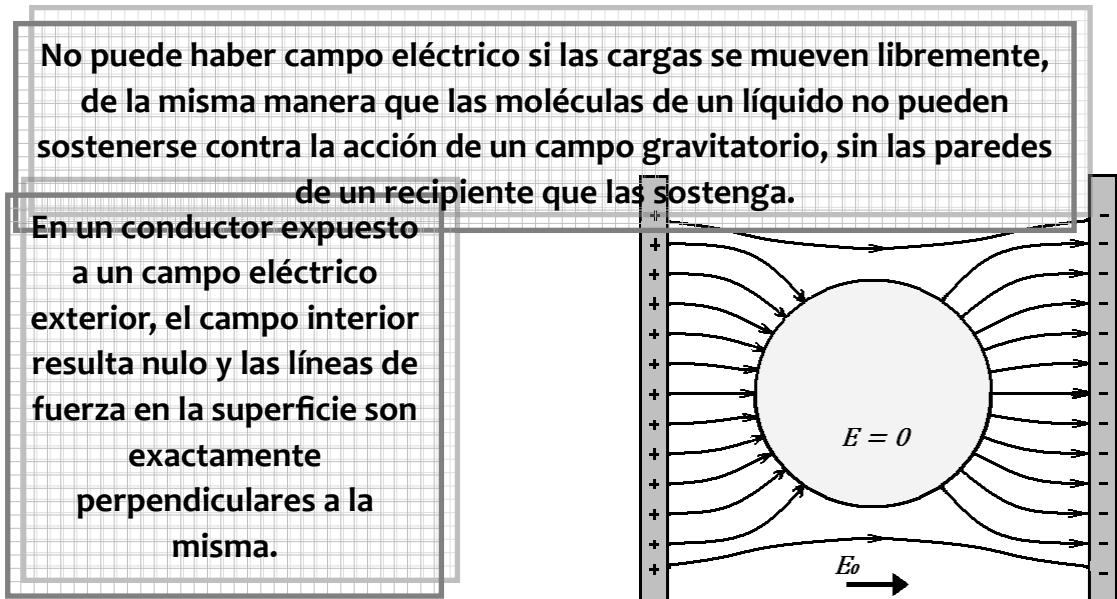
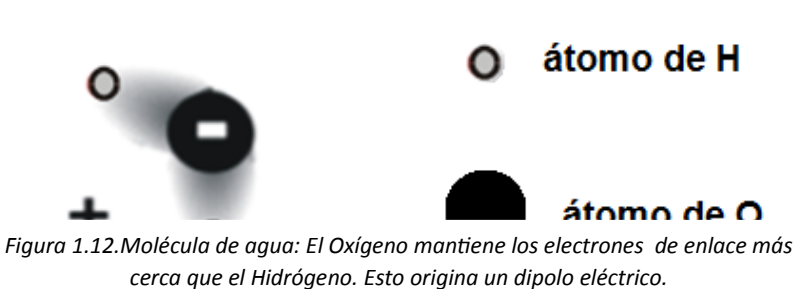


Figura 1.11. En un conductor en equilibrio, no puede haber un campo eléctrico. Las cargas libres se mueven hasta que $E = 0$

5.2 Materiales ferroeléctricos.

5.2.1 El vector polarización.

La polarización por un campo externo, como fue descrita cualitativamente en la sección 4.1, puede deberse a la orientación de dipolos moleculares pre-existentes, o bien de dipolos originados por la propia acción del campo aplicado.



En efecto, hay moléculas en las que el centro de cargas positivas no coincide con el de las cargas negativas. El agua es un ejemplo conocido en el que, debido a la dispar afinidad por los

electrones que presentan el oxígeno y el hidrógeno, se presenta un dipolo permanente, como se muestra en la figura 1.12. Aunque hay otras moléculas en las que esta situación no se presenta, por ser simétricas, pero el campo externo provoca un desplazamiento de los electrones, apareciendo entonces, un dipolo inducido.

Para tratar cuantitativamente este fenómeno se define, para el dipolo molecular, el vector **momento dipolar \mathbf{p}** , cuyo módulo es igual al producto de la carga positiva por la distancia que las separa:

$$p = q \cdot d \quad (1.22)$$

Y su dirección es de la carga negativa hacia la positiva, y el **vector polarización \mathbf{P}** del material como el momento dipolar promedio por unidad de volumen, estrictamente:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_i^N \mathbf{p}_i}{\Delta v} \quad (1.23)$$

Donde, N es el número de dipolos presentes en el elemento de volumen Δv .

Si todos los dipolos elementales están orientados al azar (Fig1.13b), $P=0$, mientras que si hay una orientación preferente $P \neq 0$, y tanto mayor cuanto más “ordenados” se encuentren. (Fig.1.13 a)

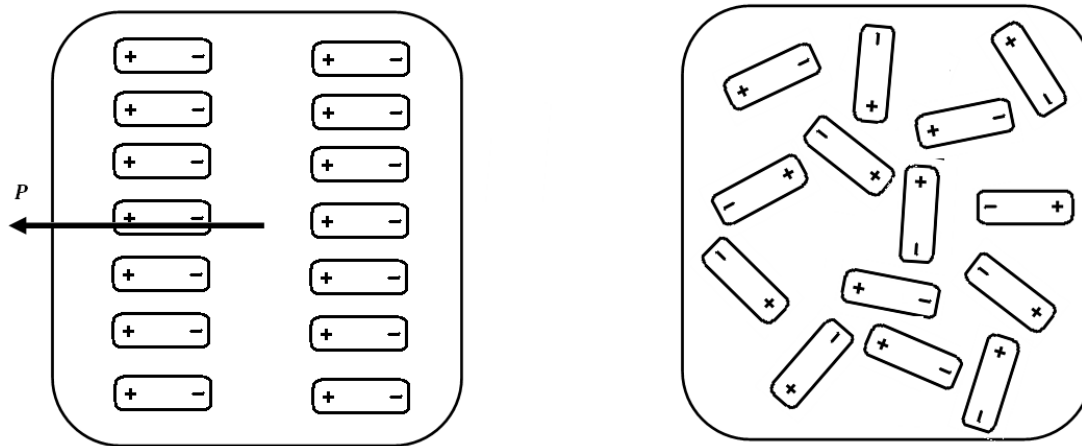


Figura 1.13 (a) material polarizado

5.2.2 Memorias ferroeléctricas. (FRAM)

(b) sin polarizar

Por la descripción que antecede podría esperarse que el estado “normal” de cualquier material fuera el representado por la Fig. 1.13 b, con los dipolos desordenados, -o bien sin la presencia de dipolos-, pero en cualquier caso, $P=0$. Esto es efectivamente así, salvo que existen unos pocos sólidos cristalinos que presentan un comportamiento anómalo. El primero en el que se detectó este comportamiento fue el tartrato de sodio y potasio en 1920. Desde entonces se ha observado en otro tipo de materiales especialmente en compuestos cerámicos de titanio.

El nombre “ferroeléctrico” es por analogía con un fenómeno similar, el ferromagnetismo, que presenta el hierro, aunque en este caso no participe este elemento.

En ellos, por debajo de cierta temperatura crítica, se detecta un valor de $P \neq 0$ y esta polarización puede tener una orientación o la opuesta, siendo ambas estables y transformables una en otra por la acción de un campo eléctrico externo. La polarización se mantiene aún en ausencia del campo externo. Esto es lo que se llama comportamiento *ferroeléctrico*.

Esta extraña propiedad es debida a que el sólido presenta, en el rango de temperaturas mencionado, dos estructuras cristalinas estables y simétricas, aunque no superponibles (como la mano derecha y la izquierda) y en ellas la posición de los iones es tal que los centros de cargas positiva y negativa, no coinciden, originando así un dipolo elemental, que puede presentar dos orientaciones opuestas.

Por encima de la temperatura crítica, la fase estable corresponde a una estructura cristalina donde no hay dipolos y el material se comporta como un dieléctrico “normal”: esto es, se polariza únicamente por la acción de un campo externo y la polarización desaparece al retirar el campo. Esto se conoce como comportamiento *paraeléctrico*.

Es decir que el estado de un material ferroeléctrico depende no sólo del campo eléctrico en el que se encuentra sino de su historia: Es un material con “memoria”. Si se usa como dieléctrico de un capacitor, éste conservará indefinidamente su carga (estado) aún sin suministro de energía, lo que abre la posibilidad de tener un dispositivo de memoria, re-escribible eléctricamente como una DRAM, (ver sección 4.5 de la Unidad IV) pero “no volátil”.

Como veremos, la integración de capacitores en muy alta escala en “chips”, es un asunto técnicamente resuelto, por lo que las FRAM son hoy una realidad presente en dispositivos como tarjetas de memoria, *pendrives* y otros dispositivos comunes en los que compite con la tecnología “Flash”, basada en los llamados transistores de puerta flotante. En la Tabla 1.1 se presenta una comparación entre ambas tecnologías.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Menor consumo</p> <p>Baja tensión de programación.</p> <p>Mayor velocidad de operación.</p> <p>Soporta mayor número de ciclos.</p> <p>Menos etapas de fabricación.</p>	<p>Materiales más caros.</p> <p>Menor integración. Aunque no está claro cuál es su límite.</p> <p>Necesidad de re-escritura con cada lectura.</p>

Tabla.1.1 Ventajas y desventajas de las memorias FRAM frente a Flash.