BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

ESPASA-CALPE, S. A. 1 MADRID

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

ESPASA CALPE S.A.

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN
DE
DON RICARDO CARO Y ANCHÍA
LICENCIADO EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS, OFICIAL DE TELÉGRAFOS Y PROFESOR DE ELECTROTECNIA Y TELEGRAFÍA EN LA ESCUELA INDUSTRIAL DE TARRASA

TOMO I

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

POR

DON RICARDO CARO Y ANCHÍA
PROFESOR EN LA ESCUELA INDUSTRIAL DE TARRASA

TERCERA EDICIÓN

ESPASA-CALPE, S. A.
BILBAO
MADRID . BARCELONA
Ríos Rosas, 24 . Cortes, 579
1930

Talleres ESPASA-CALPE, S. A., Ríos Rosas, 24. — MADRID

CAPITULO PRIMERO

Nociones preliminares

Historia. Todos los conocimientos que poseemos relativos a la electricidad y al magnetismo datan de los tres últimos siglos.

Los antiguos forzosamente observaron los fenómenos eléctricos naturales que constituyen el rayo, el relámpago y el trueno, y seguramente sufrieron sus efectos. Pero asombrados ante la grandiosidad imponente y sublime de tan deslumbradores meteoros, y desconociendo en absoluto la causa que los producía, no hallaron explicación más sencilla y más lógica en aquellos tiempos que atribuirlo todo a una fuerza misteriosa, manejada por Júpiter Tonante, que mostraba su ira ante los hombres, lanzando contra ellos formidables rayos, forjados para tal objeto en las fraguas de Vulcano.

Sólo dos hechos aislados, sin explicación alguna, nos legaron los antiguos: la atracción de los cuerpos ligeros por el ámbar frotado y la atracción del hierro por un mineral especial llamado piedra imán. El primero es debido a Thales de Mileto, que vivió en el siglo VII antes de J. C., y el segundo parece que fué importado, como la brújula, por los marinos de Oriente, hacia el siglo XI o XII de nuestra era.

Desde el descubrimiento de Thales hasta el siglo XVI los conocimientos sobre electricidad permanecieron completamente estacionados. En esta última fecha, Guillermo Gilbert, médico de la reina Isabel de Inglaterra, resucitó, por decirlo así, los fenómenos de Thales, ampliando grandemente el número de cuerpos en que pueden observarse, e inició el estudio científico de la electricidad y del magnetismo.

El lector observará, seguramente con asombro, que entre Thales de Mileto y Guillermo Gilbert media el enorme intervalo de veintidós siglos.

El cuerpo electrizado y el cuerpo imantado producían efectos aparentemente iguales: la atracción de cuerpos ligeros. Esta observación hizo pensar, desde luego, en que la electricidad y el magnetismo obedecían a una misma causa fundamental. Sin embargo, Gilbert, al clasificar las substancias influídas por la electricidad y las influídas por el magnetismo, dudó de la identidad de ambos agentes físicos y separó sus estudios.

En el siglo XVIII Gray y Wheler reconocieron la conductibilidad eléctrica de los metales, observando que sin frotarlos daban señales de electrización, con sólo ponerlos en contacto de un cuerpo electrizado. En sus experimentos llegaron a emplear conductores, que alcanzaban una longitud hasta de 886 pies, y sentaron dos principios cuyo alcance no podían seguramente imaginar. La electrización se transmitía hasta el extremo del conductor y la transmisión era instantánea. Tales afirmaciones contenían, como se ve, el germen de las transmisiones de energía, de las emisiones telegráficas y de las conversaciones telefónicas.

A partir del siglo XVIII, y muy especialmente el siglo XIX, la electricidad y el magnetismo han marchado juntos, gracias a los descubrimientos de Œsterd; y la historia de sus progresos está llena de los ilustres nombres de Faraday, Volta, Ampère y tantos otros, perpetuados los unos al dar nombre a las unidades de esta ciencia, y recordados constantemente los otros por sus inventos o aparatos importantes en el estudio o en las aplicaciones de la ciencia eléctrica.

Contemporáneos nuestros son o han sido ilustrísimos electricistas, cuyos nombres excusan todo elogio. Maxwell, Lord Kelvin, Arnold, Marconi, Fleming, etc., etc.

Sólo con tan brillante pléyade de eminentes sabios se concibe el vertiginoso progresar actual de la ciencia eléctrica, imposible de seguir en sus diversas ramas por un solo hombre, por grande que sea su capacidad y extraordinaria su facultad de asimilación.

Un día asombra al mundo científico la aparición de un electromotor, de fundamento y funcionamiento totalmente diferente de todos los anteriores. Otro día nos deslumbra un inventor afortunado con un sistema de alumbrado eléctrico que ni tiene carbones ni tiene filamento enrojecido como sus antecesores. Aquí y allá se multiplican y facilitan los medios de comunicación, centuplicando el rendimiento de los conductores telegráficos, suprimiendo la maniobra personal en las centrales telefónicas automáticas, cruzando los mares con las transmisiónes radiotelegráficas y envolviendo el mundo con las misteriosas ondas lanzadas por la Torre Eiffel, que llevan a cientos y cientos de detectores su divino beso y cuchichean muy quedo en el oído del profesional o del curioso, observaciones astronómicas, avisos de peligros para los navegantes y aun noticias de política mundial.

Ante tal cúmulo de maravillas sólo cabe exclamar como Morse exclamaba admirando su invento. ¡Cuánto ha hecho Dios!; y preguntarnos llenos de esperanzas: ¿Cuánto más hará todavía?

Métodos de estudio. La ciencia eléctrica, como ciencia física que es, ha de emplear para su progreso dos métodos de estudio, que son: *la observación* y *la experiencia*. Pero convertida por Maxwell en ciencia matemática, cuenta también con el cálculo como medio de progreso, el más seguro y el más fecundo con que puede contar una ciencia.

Seguramente a esta cualidad de ciencia matemática debe su floreciente estado actual.

El estudio de la ciencia eléctrica puede hacerse desde tres puntos de vista perfectamente definidos y por completo diferentes, que del más sencillo al más complicado son los que siguen:

Estudios de vulgarización, necesarios, como de cultura general, en los tiempos actuales en que la electricidad lo invade todo. Para este estudio bastará conocer los fenómenos fundamentales de la electricidad y del magnetismo y emplear como método explicativo del funcionamiento de líneas y máquinas las analogías hidráulicas, es decir, la comparación entre las corrientes eléctricas y las corrientes líquidas. Los conocimientos adquiridos con este método de estudio no exigen preparación previa alguna; pero no permiten ni construir ni instalar líneas ni máquinas eléctricas.

El estudio práctico, que es el que hemos realizado en los distintos tomos de esta *Biblioteca*, utiliza las fórmulas y resultados obtenidos en el estudio más elevado de la ciencia eléctrica, supone el conocimiento previo de los principios matemáticos más elementales y enseña a realizar todo lo que el sabio concibe, para llevar a la práctica la generación, transformación, transmisión y utilización de la energía eléctrica.

El estudio teórico de la ciencia eléctrica pretende penetrar todos los secretos del misterioso flúido, y contando con el cálculo matemático más elevado, como poderoso instrumento de investigación, prepara las fórmulas que el práctico ha de utilizar y las discute para su más conveniente aplicación.

No descenderemos al estudio de vulgarización ni nos elevaremos al estudio teórico; pero sí tomaremos de éste las fórmulas preparadas para su más cómodo manejo y haremos de ellas frecuentes aplicaciones numéricas, tales como se presentan en el ejercicio de la profesión del electricista, que ni ha de ser un simple obrero manual ni un profundo sabio de laboratorio.

No deben desdeñar el estudio de la electricidad, desde el punto de vista que lo hemos emprendido, los que hayan hecho de ella un estudio algo más profundo; porque, como dice Mr. Paul Janet, «después de haber adquirido regularmente, con todos los recursos del análisis matemático, los conocimientos de que se trata, es muy conveniente dejar este estudio abstracto y mirar las cosas no como meras fórmulas, sino de una manera distinta». El entendimiento gana con ello en extensión lo que pierde en rigurosidad, y hasta se amplían los mismos conocimientos; si no conociésemos una corriente de agua más que por definiciones matemáticas, seguramente encontraríamos con frecuencia dificultades para prever los más sencillos fenómenos que en ella pudieran producirse.

Energía y materia. En el estudio de las ciencias físicas se parte siempre de dos ideas fundamentales: la idea de la materia y la idea de la energía. *Materia es todo lo que afecta a nuestro sentido del tacto*; así, por ejemplo, el cobre, el hierro, la madera, etc., son formas distintas de la materia. *Energía es toda causa capaz de modificar la materia en su constitución o en su posición*, es decir, en su manera de ser o de estar. El calor, el trabajo mecánico, son formas distintas de la energía.

Aunque la materia y la energía son dos cosas distintas, que incluso se estudian por separado, no es posible encontrarlas divorciadas en la naturaleza, hasta el punto de que nunca se presenta la energía sin la materia ni existe materia que esté desprovista de energía. Así, para tener una *energía*, llamada hidráulica, en un salto de agua hace falta un gran caudal de esta *materia*, y siempre que se dispone de un caudal de *materia* agua en determinadas condiciones, es posible desarrollar cierta *energía*.

La solidaridad constante que existe entre la materia y la energía hace que se haya definido la energía como una propiedad general de la materia y a ésta como un vehículo de la energía.

El estado actual de las ciencias físicas permite ya transformar una energía en otra energía, tendiendo a demostrar que *la energía es una* y que sus distintas manifestaciones son formas accidentales.

El estado actual de las ciencias químicas permite también transformar unas en otras materias, aunque, por ahora, no pueda vislumbrarse la materia única.

Lo que no puede realizarse es la conversión de la materia en energía, ni, recíprocamente, la conversión de energía en materia.

Aun cuando exista esta independencia entre la materia y la energía, ambas se rigen por una misma ley del mundo físico. *Nada se crea ni nada se destruye; todo se transforma.*

A este principio se le llama *principio de conservación de la energía y de la materia.*

Formas de la energía. En la industria la energía se presenta en una de las cuatro formas siguientes:

Energía mecánica o trabajo.

Energía térmica o calor.

Energía química o afinidad.

Energía eléctrica o electricidad.

Cualquiera de estas cuatro formas de energía, al degenerar en forma de *energía perdida*, suele convertirse en calor.

¿Qué es electricidad? La electricidad constituye el único objeto de estudio en todos los tomos de esta Biblioteca y, por tanto, parece natural empezar por definir este misterioso flúido; pero nada más difícil que conseguirlo.

En las antiguas teorías se suponía a todo cuerpo cargado con dos flúidos iguales y de signo contrario, que, por esta cualidad, neutralizaban sus efectos sin dar ordinariamente ninguna manifestación exterior. *Electrizar un cuerpo* era solamente *separar los dos flúidos*, y en cuanto cesaba la causa que mantenía la separación, ambos flúidos volvían a reunirse, desapareciendo sus efectos y llevando nuevamente el cuerpo a *su estado neutro*. La electrización de un cuerpo, por contacto con otro cuerpo electrizado, se explicaba aplicando a la electricidad las mismas *teorías de emisión* que se aplicaban a la luz y al calor, es decir, admitiendo que el cuerpo electrizado lanzaba en todas direcciones partículas de un *flúido imponderable*, que era la electricidad.

En España la generación anterior a la nuestra estudiaba todavía en la Facultad de Ciencias una asignatura titulada «Flúidos imponderables».

La teoría de los dos flúidos no satisface, ciertamente, al espíritu; pero a falta de otra mejor, de ella se ha servido la ciencia durante muchos años y con ella ha realizado sorprendentes progresos. Conservaremos, pues, la teoría de los dos flúidos siempre que pueda servirnos para explicar algún fenómeno o el funcionamiento de algún aparato, aun cuando no creamos que las cosas suceden como dice tal teoría.

A estas ideas, debidas a Dufay, sucedieron otras hipótesis sustentadas por Franklin. Este sabio rechazó la idea de los dos flúidos, admitiendo solamente uno. Todos los cuerpos en su estado neutro, poseen, según él, cierta cantidad de flúido que no da señal alguna, por estar en perfecto equilibrio. Un cuerpo electrizado positivamente es un cuerpo con un exceso de flúido, y, en cambio, electrizado negativamente, es un cuerpo con flúido deficiente.

La teoría de Franklin tuvo aún menor éxito que la de Dufay.

Después de los trabajos de Maxwell quedó generalmente admitida la identidad de las energías lumínica, calórica y eléctrica, y se convino que todas ellas eran debidas a una misma causa, *a vibraciones del éter*, de ese supuesto flúido imponderable, perfectamente elástico, que debía llenarlo todo, lo mismo los espacios intermoleculares del más compacto sólido que los incalculables espacios interestelares.

La Física moderna, en sus investigaciones para descubrir la existencia real del éter, ese flúido inventado sólo con el fin de poder explicar la teoría de las vibraciones, no sólo ha fracasado en sus propósitos, sino que del estudio de nuevos fenómenos se ha demostrado la imposible existencia del éter. Faltando ese flúido, sobre el que se apoyaba la teoría de Maxwell, ha debido ésta ser abandonada para resucitar la teoría de los flúidos.

Según modernísimas teorías, las cargas eléctricas son *masas* flúidas que llenando los espacios intermoleculares de toda materia pueden atravesarla sin alterar su constitución. Toda molécula, de cualquier especie que sea, presenta una carga eléctrica constante, a la que se ha dado el nombre de *electrón*, y que se considera como el límite de división del flúido eléctrico en su estado neutro. Rutherford supone que el *electrón* está formado de átomos que constituyen un núcleo central, de carga positiva (llamado *electrón positivo*), a cuyo alrededor gravitan los *electrones negativos* a manera de satélites de un microscópico sistema planetario.

Esta atrevida teoría sobre la composición atómica de la electricidad está teniendo gran aceptación, por creerse muy aproximada a la verdad, ya que siguiendo distintos procedimientos, ha sido posible medir la carga constante de un electrón.

De todos modos, para satisfacción del espíritu, no hemos ganado mucho con los cambios de sistemas para definir la electricidad y, en el terreno elemental, ni siquiera hemos ganado en claridad para la explicación de los fenómenos eléctricos.

Pero como, en resumidas cuentas, no necesitamos conocer la esencia de la electricidad para estudiar sus efectos, sus aplicaciones y sus peligros, ni tampoco los sabios han necesitado conocerla para someter su estudio al cálculo matemático y convertirla en el primer elemento de progreso de nuestra civilización actual, confesemos paladinamente que *no sabemos lo que es electricidad*, y admitámosla como una nueva manifestación de la energía, como un algo que se desarrolla en los cuerpos por medios mecánicos o químicos, y que se transmite, por algunos de ellos, con una velocidad comparable a la de la luz, es decir, prácticamente infinita para las distancias que en nuestro planeta podemos considerar.

¿Qué es magnetismo? Nuestra confesada ignorancia de cuanto se refiere al conocimiento de la electricidad, tenemos que extenderla, desgraciadamente, al magnetismo.

Es probable que si llegásemos a conocer íntimamente la electricidad, llegaríamos a conocer también el magnetismo. Las importantes teorías y aplicaciones del electromagnetismo, y la lógica teoría de Ampère sobre los imanes dejan vislumbrar una relación íntima entre ambos agentes físicos; pero hoy por hoy tan misterioso es para nosotros un imán como una corriente eléctrica.

La electricidad en su forma estática, es decir, estacionada sobre un conductor, y el magnetismo estacionado del mismo modo en el interior de una barra de hierro, tienen puntos de analogía que permiten reunirlos para estudiar de una sola vez fenómenos similares de los dos agentes físicos.

Para comprender en una sola denominación los flúidos eléctricos y los magnéticos los designaremos con el nombre genérico de *masas activas*.

CAPITULO II

Fuerzas newtonianas

Fuerzas y masas. Se llama *movimiento* o movilidad la propiedad de la materia, merced a la cual todo cuerpo puede ocupar distintas posiciones en el espacio.

Fuerza es toda causa capaz de producir un movimiento o de modificarlo si ya existe.

La fuerza puede obrar sobre la materia sólo durante un momento, llamándose entonces *fuerza instantánea*, o puede obrar durante un tiempo más o menos largo, y en tal caso se llama *fuerza continua.*

La fuerza instantánea produce sobre la materia un *movimiento uniforme*, obligando al móvil a recorrer espacios iguales en tiempos iguales. La relación entre el espacio s recorrido y el tiempo t empleado en recorrerlo constituye la velocidad v en el movimiento uniforme. Así:

$$v = \frac{s}{t} \qquad [1]$$

Según esta fórmula, podemos decir que *la velocidad de un móvil* con movimiento uniforme *es el cociente de dividir el espacio recorrido por el tiempo empleado en recorrerlo.*

Las fuerzas continuas pueden obrar sobre la materia, conservando constante su intensidad durante todo el tiempo de su aplicación, o pueden obrar con una intensidad que cambie de un momento a otro. Las primeras son *fuerzas constantes* y las segundas *fuerzas variables.*

Una fuerza constante imprime a la materia un movimiento que se llama *uniformemente* variado, durante el cual la velocidad cambia como cambia el tiempo. La relación entre la velocidad y el tiempo permanece constante y constituye la aceleración a del movimiento uniformemente variado. Así:

$$a = \frac{v}{t}$$

Una fuerza variable imprime a la materia un movimiento *variado sin uniformidad*, en el cual la aceleración deja de ser constante.

Un ejemplo de fuerza constante por todos conocida es la *gravedad* o atracción que la tierra ejerce sobre todos los *cuerpos pesados* o *cuerpos graves.*

Esta fuerza es constante y por sus efectos parece emanar del centro de nuestro planeta; de manera que un cuerpo abandonado al efecto de gravedad o pesantez se dirigiría hacia aquel punto a no impedírselo la impenetrabilidad del suelo.

Como fuerza constante produce un movimiento uniformemente variado: *acelerado* si el cuerpo se acerca al centro de la tierra, y *retardado* si se aleja impulsado por otra fuerza instantánea.

La aceleración particular correspondiente a la gravedad se indica siempre por la letra g, y su valor varía de un lugar a otro, según las latitudes geográficas.

En España puede tomarse como valor suficientemente aproximado

$$g = 9{,}81 \textit{ metros / segundo}$$

Peso de un cuerpo es sencillamente el efecto de la fuerza de gravedad que obra sobre él.

En los movimientos uniformemente variados permanece constante la relación entre la fuerza f y la aceleración, y a esta constante se le llama *masa* del móvil. Así:

$$m = \frac{f}{a}$$

Si tomamos como fuerza particular el peso p y llamamos g a la aceleración que la gravedad imprime a los cuerpos que caen, tendremos, como antes,

$$m = \frac{p}{g}$$

y podremos decir que *masa de un cuerpo es la relación entre su peso y la aceleración de la gravedad.*

Partiendo de la idea de masa, podemos dar una nueva definición de fuerza,

$$f = ma$$

es decir, *fuerza que obra sobre un cuerpo es el producto de la masa de este cuerpo por la aceleración que recibe.*

Trabajo y potencia. El trabajo mecánico es una de las formas en que se manifiesta la energía. Todo el mundo tiene clara idea de lo que es el trabajo mecánico, y su definición técnica viene dada por la fórmula

$$j = f.s \qquad [2]$$

es decir, que el trabajo j de una fuerza que actúa sobre un cuerpo es *el producto de la fuerza por el camino recorrido por el cuerpo.*

Esta definición supone que el camino recorrido por el cuerpo coincide con la dirección de la fuerza. Más adelante generalizaremos esta definición (tomo II, capítulo primero).

Es evidente que un mismo trabajo puede realizarse con más o menos prontitud. Así, por ejemplo, el transporte de 2.000 kilogramos de mercancías a 3.000 metros de distancia, puede realizarlo un hombre fuerte en menos tiempo que un hombre débil. Diremos que el primero es más potente que el segundo. Luego, en general, *llamaremos potencia* w *a la relación del trabajo y el tiempo,*

$$w = \frac{j}{t} = \frac{f.s}{t} = f\frac{s}{t}$$

y recordando el valor de la velocidad [1] en los movimientos uniformes,

$$w = f.v$$

es decir, que *en los movimientos uniformes, la potencia es igual al producto de la fuerza por la velocidad.*

Unidades de medida. Para las aplicaciones numéricas de las fórmulas establecidas, en lo que llevamos dicho en este capítulo, adoptaremos las unidades siguientes:

El tiempo t se medirá en segundos.

El espacio s, recorrido por un móvil, en metros.

La velocidad v y la aceleración a se miden en metros por segundo.

La fuerza y el peso se expresan en kilogramos.

Las cantidades compuestas de longitudes, tiempos y pesos, exigen unidades compuestas también. Así, las masas se expresan en kilogramos-masa, los trabajos en kilogramos-metros o kilográmetros y las potencias en kilográmetros-segundo.

El Congreso de electricistas reunido en París el año 1885 estableció un sistema universal de medidas eléctricas, adoptando como unidades fundamentales el centímetro, el gramo-masa y el segundo; por lo cual el sistema se denomina *centímetro, gramo, segundo*, o bien, con las iniciales de estas palabras, *C.G.S.* o *cegesimal.*

Todas las fórmulas obtenidas por el cálculo vienen expresadas en unidades cegesimales; por consiguiente, al expresar las cantidades en unidades usuales o prácticas, deben multiplicarse por coeficientes especiales, que señalaremos en cada uno de los casos que vayamos hallando, guardando la justificación de tales coeficientes para cuando estudiemos de un modo completo el sistema cegesimal, en el tomo II.

Fuerzas newtonianas. Entre las fuerzas variables de que hemos hablado anteriormente nos interesan de un modo especial las llamadas *fuerzas centrales*, que son las emanadas de un punto y cuya intensidad cambia con la distancia entre aquel punto y el cuerpo sobre que obran.

Todavía precisaremos más. Entre las fuerzas centrales estudiaremos únicamente las newtonianas, en las cuales *la intensidad varía en razón inversa del cuadro de la distancia*. Una fuerza newtoniana es la de gravedad a que hemos aludido ya anteriormente.

La gravedad es debida a la atracción que ejerce la masa material de nuestro planeta sobre las demás masas materiales que están próximas a él, y la ley que hemos enunciado como reguladora de las fuerzas newtonianas nos indica que si la gravedad ejerce sobre un cuerpo pesado un efecto de un kilogramo, cuando este cuerpo dista del centro de la tierra un radio terrestre, llevando el cuerpo a las distancias de 2, 3, 4... radios terrestres, los efectos serían $^1/_4$, $^1/_9$, $^1/_{16}$ ... menores.

Cuando se estudia la gravedad se admite que la atracción entre masas graves es una propiedad inherente a la materia, que radica en la materia misma. Es una manifestación de la energía que no puede separarse de la materia.

Las fuerzas eléctricas y magnéticas son también fuerzas newtonianas; pero como manifestaciones de la energía, no son, como la gravedad, inherentes a la materia. La materia no puede existir sin peso, pero sí puede existir sin estar ni imantada ni electrizada.

La imantación y electrización debe provocarse en los cuerpos por procedimientos físicos o químicos, y cuando aparece, se rige por la misma ley enunciada para las fuerzas newtonianas y se transmite a distancia, mediante vibraciones de ese medio imponderable, sutil y perfectamente elástico, llamado *éter*, cuya existencia seguimos admitiendo, para facilitar la explicación de los fenómenos eléctricos.

Masas activas. Seguramente con la idea de establecer mayor analogía entre el estudio de la electricidad o del magnetismo y el estudio de la gravedad cuando un cuerpo se electriza o se imanta, se dice que aparece en él *una masa eléctrica o una masa magnética*, que obra sobre otras masas análogas a ella, del mismo modo que la masa material obra sobre sus análogas.

La masa magnética y la masa eléctrica se reúnen en la denominación única de *masa activa*, según hemos dicho anteriormente, y alguna vez se les llama también *cargas*.

La masa eléctrica aparece en un cuerpo siempre que se le frota, aun cuando no siempre pueda demostrarse experimentalmente su existencia.

Tomemos una barra de lacre, de las comúnmente empleadas como objeto de escritorio, y frotémosla fuertemente con un paño de lana, con la manga de la chaqueta, y quedará electrizada. En prueba de ello, acerquémosla a objetos ligeros, recortes de papel o barbas de pluma, y veremos que los atrae.

El mismo experimento puede hacerse con una barra de vidrio. Sin embargo, las masas eléctricas que aparecen en el lacre y en el vidrio, difieren en algo esencial que señalaremos luego. Por de pronto, distingamos las dos electricidades obtenidas llamándolas *resinosa* y *vítrea*, respectivamente.

Las masas magnéticas aparecen en los hierros, por la influencia de otras barras imantadas ya, o por la acción de las corrientes eléctricas, según veremos en el capítulo VII de este mismo tomo. También aparecen masas magnéticas de dos clases distintas, que llamaremos *norte* y *sur*.

Una diferencia esencial entre las masas magnéticas y las masas eléctricas es que en una barra electrizada puede existir masa eléctrica de una sola clase, sólo vítrea o sólo resinosa, mientras en una barra imantada han de existir forzosamente masas magnéticas de las dos clases, norte y sur.

Atracciones y repulsiones. Otra diferencia hemos de señalar también entre las masas materiales o graves y las masas activas eléctricas o magnéticas. Dos masas materiales se atraen siempre; pero dos masas eléctricas o dos masas magnéticas, unas ve-

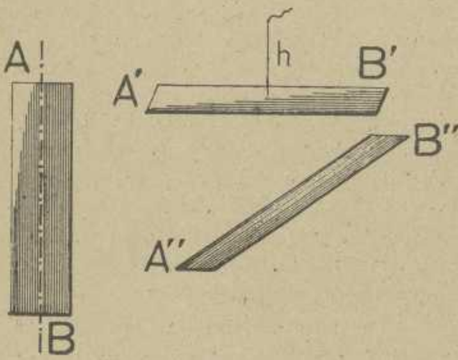


Fig. 1

ces se atraen y otras se repelen, según es fácil comprobar por medio de sencillos expesimentos.

Tomemos una hojita de acero, de forma rectangular *AB* (fig. 1), imantémosla fuertemente y cortémosla en dos mitades iguales, en el sentido de su mayor dimensión. Una de estas mitades *A′B′* suspendámosla por su centro de gravedad, de un hilo *h*, de manera que gire libremente y fije por sí misma la posición de equilibrio. Tomemos la otra mitad *A″B″*, y aproximemos un extremo de ella a un extremo de la suspendida.

Si los extremos que se aproximan son los *B′ B″*

o A' A'' que juntos formaron un extremo de la lámina AB, la laminita suspendida huye de la que le presentamos; luego *las masas magnéticas iguales se repelen*. En cambio, si los extremos que se aproximan son los A' B'', o A'' B', que eran opuestos en la lámina primitiva AB, las dos laminillas se atraen; *luego las masas magnéticas diferentes se atraen.*

En el caso de masas eléctricas, puede hacerse un experimento igualmente sencillo.

Formemos dos pendulillos con bolitas de medula de saúco, A y B, suspendidas de hilos de seda (fig. 2). Comuniquemos a las dos esferillas masas eléctricas iguales, tocándolas con una misma barra de lacre, previamente frotada, y las esferillas tendrán tendencia a separarse. Electricémoslas tocando la una con la barra de lacre y la otra con una barrá de vidrio, y las esferillas tenderán a juntarse.

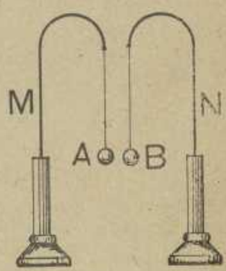


Fig. 2

Resulta en la electricidad, como en el magnetismo, que las *masas activas iguales se repelen* y *las masas desiguales se atraen.*

Ya que los efectos son opuestos, admitiremos que las masas son también opuestas, y las distinguiremos con los nombres de *masas positivas* y *masas negativas.*

La tierra que habitamos presenta en su masa material efectos también de masas magnéticas, acumuladas próximamente en los polos geográficos. Si suspendemos una aguja imantada, por su centro de gravedad, de manera que pueda oscilar libremente, la veremos orientarse siempre en una misma dirección y un mismo sentido. Llamaremos masa *positiva, norte o boreal*, la contenida en el extremo de la aguja que se dirige al sur de la tierra, y masa *negativa, sur o austral*, la del extremo que se dirige al norte terrestre.

En electricidad se llama masa *positiva o vítrea* la producida mediante el frotamiento del vidrio, y masa *negativa o resinosa* la producida en el lacre.

Medida de las masas activas. Aceptada la existencia de estas masas activas, para someterlas a cálculo, lo primero que debemos hacer es *compararlas y medirlas.*

Para comparar dos masas activas, *A* y *B* (fig. 3), se coloca, equidistante de ellas, una tercera masa *C*, y en el caso de que ésta no sufra desviación, puede asegurarse que las dos masas comparadas son iguales, puesto que producen los mismos efectos de atracción o de repulsión, sobre la masa equidistante. Cuando la masa *C* es del mismo signo que las otras dos y se desvía hacia una de ellas, *B*, la mayor masa activa es la *A*, puesto que repele a la *C* con más fuerza que la *B*; pero si la masa *C* es de signo contrario a las que se comparan, resulta mayor la masa *B*, por ser la que más atracción produce sobre *C*.

La desviación de la masa equidistante *C* desaparece acercando o separando la masa *B*, según sea del mismo signo o de signo contrario. Si para restablecer el equilibrio se hace la distancia *b* 2, 3, 4... veces mayor que la *a*, la masa *B* resulta 4, 9, 16... veces superior a la *A*; y si *b* se ha de reducir a la $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$... parte de *a*, es que la carga de *B* vale la $^1/_4$, $^1/_9$, $^1/_{16}$ ... parte de A, con arreglo a la ley del cuadrado de las distancias.

Cuando se sabe comparar se sabe medir. Basta fijar una cantidad perfectamente determinada, que se toma como unidad, y comparar con ella la cantidad que se quiere medir. El resultado de la comparación es el *número o medida*. Este será el proce-

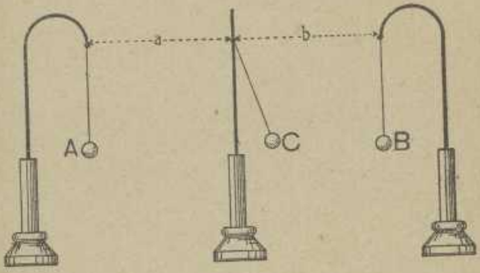


Fig. 3

dimiento que emplearemos para medir las cargas eléctricas y magnéticas.

Así, en la figura 3, si se adopta la carga A como unidad de medida y la distancia a se toma igual a 1, para medir la masa activa de B basta buscar la distancia b de equilibrio, y el cuadrado de su medida da el valor numérico de B.

Dsnsidad de una carga. Un cuerpo electrizado mantiene la carga sobre su superficie, según veremos. La relación entre la carga o masa m y la superficie s del cuerpo se llama *densidad superficial*, y se representa generalmente por la letra griega σ (sigma minúscula), de manera que

$$\sigma = \frac{m}{s}$$

es la masa acumulada en un centímetro cuadrado de superficie.

Un cuerpo imantado mantiene su carga en el interior de su volumen. La relación entre la carga o masa y el volumen v del cuerpo se llama *densidad cúbica*, y se representa generalmente por la letra griega δ (delta minúscula), de manera que

$$\delta = \frac{m}{v}$$

es la masa contenida en un centímetro cúbico.

Una superficie se dirá que está *uniformemente cargada* cuando la densidad superficial sea la misma en todos los elementos de su superficie, y, del mismo modo, se dirá que un cuerpo está *uniformemente cargado* cuando la densidad cúbica sea la misma en todos los elementos de su volumen.

Campo de fuerza. La ley elemental de las fuerzas newtonianas, que quedó enunciada en párrafos anteriores, permite calcular numéricamente y reducir a fórmula matemática el efecto mutuo que se produce entre dos masas activas m y m' situadas a una distancia r. Adoptemos como unidad de fuerza la ejercida por la unidad de masa actuando sobre la unidad de masa a la unidad de distancia, y es evidente que la fuerza crecerá cuando crezcan las masas; pero, además, como fuerza newtoniana que es, decrecerá como el cuadrado de la distancia; luego podremos escribir:

$$f = \frac{mm'}{r^2}$$

A este valor absoluto le pondremos el signo + o el signo $-$, según el convenio que establezcamos para representar los efectos atractivos o repulsivos.

Llamaremos *campo de fuerza* al espacio en que son perceptibles los efectos de las masas activas. Para estudiar un punto del campo producido por varias masas activas m, m', m''..., supondremos colocada en dicho punto la unidad de masa positiva, el $+1$, que llamaremos *punto activo*. Por la fórmula última podrán calcularse las distintas acciones que las diversas masas generadoras del campo ejercen sobre el punto activo

$$f = \frac{m \times 1}{r^2} \quad f' = \frac{m'}{r'^2} \quad f'' = \frac{m''}{r''^2} \ldots,$$

y conocidas estas fuerzas en magnitud y dirección, podrá determinarse completamente su resultante, mediante el *polígono de las fuerzas*, conocido por la mecánica elemental.

La intensidad y dirección de la resultante son la *intensidad y dirección del campo en este punto.*

En resumen, se entiende por intensidad de un punto del campo *la fuerza, atractiva o repulsiva, que el campo ejerce sobre la masa $+1$ colocada en dicho punto.* Esta intensidad la representaremos siempre por **H**.

Si el campo está producido por una sola masa m, la intensidad en un punto a la distancia r será

$$\mathrm{H} = \frac{m}{r^2}$$

y la acción de este campo, sobre otra masa m', podrá expresarse así:

$$f = \frac{mm'}{r^2} = \frac{m}{r^2} \times m' = \mathrm{H}m'$$

poniendo **H** en lugar de su igual $\frac{m}{r^2}$.

Teóricamente la extensión de los campos es infinita, puesto que el efecto de una fuerza no se anula hasta que r es infinito; pero prácticamente se llega pronto a distancias en las cuales no se notan los efectos de las masas activas por potentes que sean.

Potencial. Una masa $+1$, sometida a la acción de otra masa fija m, es atraída o repelida por ésta y puede efectuar un trabajo moviéndose de un punto a otro. Pero si la masa $+1$ fuese también fija, es evidente que el trabajo no se realizaría y la *energía o posibilidad de trabajo* quedaría latente en la masa $+1$, dispuesta a convertirse en trabajo en cuanto las condiciones le sean favorables. A esta *aptitud para desarrollar un trabajo*, se le da el nombre de energía potencial o simplemente *potencial*. Así resulta que el potencial de un punto del campo de fuerza *es el trabajo que podría desarrollar la masa unidad* $+1$ *situada en dicho punto.*

Si las masas m y $+1$ están separadas por una distancia r, entre ellas se ejercerá una fuerza

$$f = \frac{m}{r^2}$$

y la energía potencial o trabajo realizable cuando pueda moverse la $+1$, será el producto de la fuerza por el camino recorrido (2).

$$V = f \times r = \frac{m}{r^2} \times r = \frac{m}{r}$$

representando por V el potencial.

Si la masa $+1$ estuviera sometida a la acción simultánea de varias masas activas m, m', m'', ... es decir, situada en el campo producido por estas masas, su potencial total sería

$$V = \frac{m}{r} + \frac{m'}{r'} + \frac{m''}{r''} + \dots,$$

cuya suma, de términos análogos, se representa abreviadamente por

$$V = \Sigma \frac{m}{r}$$

Aclaremos todavía más la idea de potencial con un ejemplo vulgar.

La masa de la tierra determina la formación del campo gravitatorio terrestre, en el cual todos los cuerpos pesados tienden a dirigirse al centro del planeta. Una piedra situada en un tejado es un cuerpo grave con tendencia a caer hacia el centro de la tierra, y, si no se mueve, es porque la resistencia del tejado se lo impide. Si la piedra se quedase sin el apoyo del tejado, caería, es decir, la fuerza de la gravedad le haría recorrer un camino, y esta fuerza y este camino equivalen a un *trabajo realizado*. En la piedra, pues, existía un *trabajo realizable* o *potencial*, que se ha realizado en cuanto las condiciones han sido adecuadas para ello.

El potencial depende de la posición de la masa influída por el campo.

Diferencia de potencial. Continuemos aún refiriéndonos al campo gravitatorio.

Supongamos que la piedra, al quedarse sin el apoyo del tejado, ha caído hasta un balcón, y en su nueva posición, es evidente que tendrá un potencial distinto, que llamaremos V'.

El *trabajo realizado* en la caída J, debe ser forzosamente la diferencia entre los *trabajos realizables* o *potenciales* que la piedra tenía en el tejado y tiene en el balcón, es decir,

$$J = V - V'$$

Aplicando este resultado a nuestros campos de fuerza, magnéticos y eléctricos, podremos decir que *el trabajo realizado por una masa activa que se mueve en un campo de fuerza, es igual a la diferencia de potenciales correspondientes a las posiciones extremas de la masa móvil.*

Potencial absoluto. Si una de las posiciones extremas de la masa móvil fuese el límite del campo, en ella el potencial sería nulo, y la igualdad última se reduciría a

$$J = V \quad \text{o} \quad J = -V',$$

lo cual nos dice que el *potencial absoluto de un punto activo es igual al trabajo que supone llevar el punto desde su actual posición al límite del campo o traerlo desde el límite del campo hasta su posición actual.*

Energía relativa de varias masas. Al establecer la definición de potencial hemos supuesto que una masa m influía sobre una masa $+1$, y hemos establecido como expresiones de la fuerza y del potencial

$$f = \frac{m}{r^2} \qquad V = \frac{m}{r}$$

Si en lugar de ser $+1$ la masa influída, fuese una masa cualquiera m', el trabajo realizable se llama entonces *energía relativa* y tiene por expresión

$$g = \frac{mm'}{r} = m'\frac{m}{r} = m'V$$

y si, en lugar de ser una sola masa influyente y una sola masa influída, fuesen varias masas influyéndose mutuamente, su energía relativa se expresaría:

$$G = \Sigma m'V$$

Superficies equipotenciales. En el campo de fuerza producido por una o varias masas activas, pueden determinarse una serie de puntos escogidos con la condición de que todos tengan el mismo potencial k. Estos puntos forman una *superficie de potencial constante o equipotencial*, que goza de las dos propiedades siguientes:

1.ª *Cuando un punto activo se mueve sobre una superficie equipotencial el trabajo realizado*

$$J = V - V'$$

es nulo, ya que para todos los puntos de la superficie se tiene por definición

$$V = V' = V'' = ... = k$$

2.ª En el movimiento de un punto activo sobre una superficie equipotencial, para que el trabajo sea nulo, la fuerza debe ser normal a la superficie, es decir, que *en un campo de fuerza la intensidad en un punto cualquiera es normal a la superficie equipotencial que pasa por este punto.*

Líneas de fuerza. En un campo de fuerza pueden trazarse cuantas superficies equipotenciales se deseen, bastando para ello fijar distintos valores para la constante k. Así, por ejemplo, en el campo representado por la figura 4, suponemos que para distintos valores de k se han obtenido las superficies equipotenciales que cortan el plano de la figura según las líneas A, B, C, ...

En un punto a de la primera superficie se traza una normal ab, que representa en dirección la intensidad del campo en el punto a. Se prolonga esta normal hasta que corte en b a la segunda superficie, y en b se traza la normal bc a esta segunda superficie, prolongándola hasta el punto c de la tercera, y así sucesivamente.

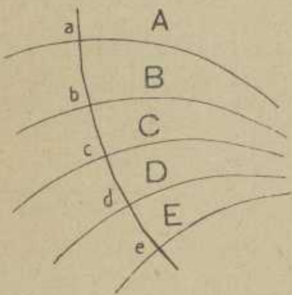


Fig. 4

Se obtiene un polígono cuyos lados ab, bc, cd,... pueden hacerse tan pequeños como se quiera, multiplicando el número de superficies A, B, C, D, ... La curva hacia la cual tiende el polígono $abcd$ ... al reducirse sus lados se llama línea de fuerza. Diremos, pues, que *línea de fuerza es una línea recta o curva que corta normalmente a todas las superficies equipotenciales de un campo de fuerza.*

Campos radiados y campos uniformes. El campo de fuerza producido por una sola masa activa tiene como superficies equipotenciales una serie de esferas concéntricas, cuyo centro común corresponde al punto ocupado por la masa activa. Las líneas de fuerza serán radios de las superficies esféricas.

Esta forma de campo radiado es la que corresponde al campo gravitatorio terrestre, ya que está producido como si hubiera una sola masa activa situada en el centro de la tierra.

Se llama campo uniforme el que tiene sus líneas de fuerza paralelas entre sí, y, por tanto, sus superficies equipotenciales son planos paralelos.

El campo gravitatorio terrestre puede considerarse como campo uniforme dentro de los límites de un gabinete de experimentación, siendo sus líneas de fuerza verticales y sus superficies equipotenciales planos horizontales o de nivel.

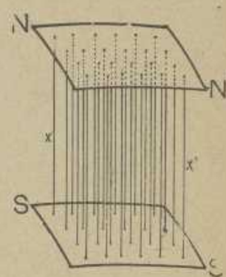


Fig. 5

Por extensión de este caso particular se llama en todos los casos superficies de nivel a las superficies equipotenciales, distinguiéndose en superficies de nivel magnético y superficies de nivel eléctrico según la clase de masa activa que produzca el campo de fuerza.

Un campo de fuerza se representa siempre por sus superficies equipotenciales N, N' y S, S' (fig. 5) y por sus líneas de fuerza x, x', del mismo modo que en topografía se representa un terreno por sus líneas de nivel y sus líneas de máxima pendiente.

Las superficies equipotenciales, *siempre normales a las líneas de fuerza*, se pueden dibujar con una separación cualquiera, mientras las líneas de fuerza se ha convenido en representarlas de modo que por cada centímetro cuadrado de superficie equipotencial pasen un número **H** igual a la intensidad del campo en aquel punto.

Flujo de fuerza. Llamaremos flujo de fuerza en una superficie al número total de líneas de fuerza que la atraviesan. Siendo **H** el número de líneas de fuerza que pasan por cada centímetro cuadrado, si representamos por s el número de centímetros cuadrados de una superficie equipotencial es evidente que el flujo de la misma que representaremos por **N**, será

$$N = \mathbf{H}s$$

Tubo de fuerza. Cuando sobre una superficie equipotencial Z (fig. 6) se traza una curva cerrada np, ocurre que el conjunto de líneas de fuerza que pasan por la curva forman una superficie tubular, que limita todo un haz de líneas de fuerza y es lo que se conoce con el nombre de *tubo de fuerza*.

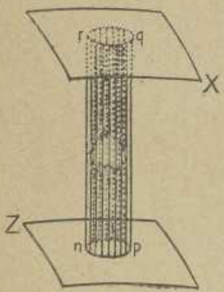


Fig. 6

Como todas las líneas de fuerza tienen la misma dirección, no habrá nunca en un tubo de fuerza ni líneas entrantes ni salientes, de modo que su número será siempre el mismo, contadas las líneas en cualquier sección normal del tubo, es decir, que *el flujo de fuerza es constante a lo largo de un tubo.*

Si el número de líneas no varía dentro del tubo es evidente que estas líneas se presentarán más densas cuanto menor sea la sección del tubo que se considera, o en otros términos, *a lo largo de un tubo, la intensidad del campo está en razón inversa de la sección.* Según esto, si el tubo de la figura 6 se corta por dos superficies equipotenciales Z y X, sucederá que entre las intensidades **H**, **H'** y las secciones s, s' de np y rq se cumplirá la siguiente proporción:

$$\frac{\mathbf{H}}{\mathbf{H}'} = \frac{s'}{s}$$

En un campo radial los tubos de fuerza son cónicos, y en un campo uniforme los tubos de fuerza son cilíndricos.

Flujo total emitido por una masa. En el campo producido por una sola masa, la intensidad en un punto activo situado a la distancia 1 de la masa, será

$$\mathbf{H} = \frac{m \times 1}{1^2} = m$$

y el flujo que atraviesa una superficie ω, perteneciente a la esfera de radio 1,

$$N = \mathbf{H}\omega = m\omega$$

Si la superficie ω fuese toda la de la esfera tendríamos el flujo total emitido por la masa

$$N = 4\pi m$$

Esta conclusión es cierta para cualquier número de masas contenidas en el interior de una superficie cerrada, aun cuando no sea esférica; constituye el teorema de Gauss, se expresa por

$$N = \Sigma 4 \pi m = 4 \pi \Sigma m$$

y tiene el siguiente enunciado: *El flujo que sale de una superficie cerrada es igual a cuatro veces la suma, Σ, de masas interiores.*

Acción de una superficie sobre un punto. Si una superficie cerrada se carga uniformemente e influye sobre un punto tendremos:

1.° Si el punto es interior la acción es nula.

2.° Si el punto pertenece a la superficie la acción es $\mathbf{H} = 4\,\pi\sigma$, siendo σ la densidad superficial de la carga.

3.° Si el punto es exterior la acción es $\mathbf{H} = 4\,\pi\sigma\,\frac{s}{s'}$, siendo s y s' las secciones de un tubo de fuerza, correspondientes a la superficie cargada y a la situación del punto.

4.° Si la superficie fuese esférica, su acción sobre un punto exterior que dista r del centro es la misma que si toda la carga se hubiera condensado en el centro de la esfera, es decir, $\frac{M}{r^2}$, siendo M la carga.

Presión superficial. Es evidente que en una superficie cargada, cada uno de sus elementos de masa es repelido por todos los demás, ya que son del mismo signo.

Llamaremos presión superficial a la repulsión ejercida en la unidad de superficie por el resto de la superficie cargada. Esta acción se expresa referida a la densidad superficial de la carga σ o a la intensidad $\mathbf{H}$ del campo en un punto de la superficie, respectivamente, por las fórmulas

$$p = 2\,\pi\,\sigma^2 \quad \text{o} \quad p = \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi}$$

CAPITULO III

Los imanes

Clasificación de los imanes. Los imanes son cuerpos caracterizados por la propiedad de atraer las limaduras de hierro. A esta propiedad se le llama *imantación* o *imanación*.

La imantación puede presentarse naturalmente en un cuerpo, como sucede en el óxido de hierro magnético, o puede producirse artificialmente, como se hace con una barra de acero. Esto da lugar a la primera clasificación de los imanes en *naturales* y *artificiales*.

En un imán artificial la imantación puede subsistir aun cuando cese la causa que la produjo, como sucede en el acero, o bien puede cesar cuando desaparezca aquella causa, como sucede en el hierro dulce. Clasificaremos, por tanto, los imanes artificiales en *permanentes* y *temporales*.

Leyes de la imantación. La imantación es una fuerza central newtoniana; luego se le podrá aplicar todo cuanto se ha dicho en el capítulo II referente a aquellas fuerzas.

La acción mutua de dos masas magnéticas m y m', situadas a una distancia r, tiene por expresión (*)

$$f = \frac{mm'}{r^2}$$

Campo magnético será el espacio en el cual se manifiesten fuerzas magnéticas.

La distribución de un campo magnético en el espacio se pone de manifiesto mediante el siguiente experimento llamado espectro magnético; sobre una cartulina, que cubra la barra imantada, se diseminan finas limaduras de hierro, las cuales, influídas

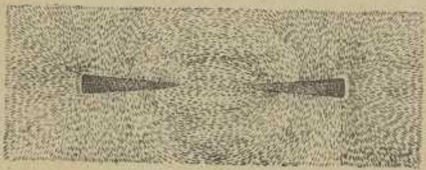


Fig. 7

por el campo, se orientan formando semicírculos (figura 7), que marcan la dirección de las líneas de fuerza del campo.

Intensidad del campo en uno de sus puntos es la resultante de todas las acciones ejercidas sobre la unidad de magnetismo situada en este punto por las diversas masas magnéticas que producen el campo. Esta intensidad se representa generalmente por **H.**

(*) Las cantidades que se refieran al magnetismo las representaremos por letras negritas, para distinguirlas de sus análogas referidas a la electricidad que serán letras cursivas.

La unidad para medir intensidades de campo magnético es el *gausio* (*).

Potencial magnético de una masa situada en un campo es el trabajo que podrá realizar esta masa cuando pueda moverse libremente. Se representa por

$$V = \Sigma \frac{m}{r}$$

Superficies equipotenciales son las formadas por puntos del campo que tienen todos el mismo potencial.

Líneas de fuerza serán las líneas que corten normalmente a todas las superficies equipotenciales.

Imán situado en un campo uniforme. Si un imán en forma de barra se aproxima a un montón de limaduras de hierro se ven adherirse las limaduras formando penachos en los extremos de la barra; pero, en cambio, la región central de la barra queda limpia o casi limpia de tales adherencias (fig. 7). Conforme con esta observación, se dice que las masas magnéticas se concentran en los extremos de las barras, llamados *polos*, y no dan efecto alguno en la región media, llamada *línea neutra*.

Si la barra imantada se apoya por su centro de gravedad en un eje vertical sostenido por un corcho flotante, y el todo se abandona sobre una superficie de agua tranquila para que quede sometido a la acción del campo magnético terrestre, sensiblemente uniforme, observaremos que el imán se orienta siem-

(*) La Academia Española no ha incluído aún en su diccionario los nombres de las unidades magnéticas. La de que hablamos está dedicada al eminente físico Gauss, y le llamamos *gausio*, teniendo en cuenta la terminación adoptada por la Academia para las unidades eléctricas y teniendo también en cuenta la opinión del académico correspondiente doctor D. Angel Sallent.

pre en una misma dirección y sentido, y, además, los movimientos de la aguja son sólo de rotación, pero no de traslación. De aquí se deducen dos consecuencias importantes:

1.ª *Las masas magnéticas acumuladas en los polos de una barra imantada son de signos contrarios*, como los polos magnéticos terrestres.

2.ª *Las masas magnéticas de los polos de un imán son iguales en valor absoluto*, ya que ninguna de ellas vence a la otra para determinar una traslación del imán.

En una barra imantada se supone que las líneas de fuerza marchan del polo norte al polo sur por fuera de la barra, y del sur al norte por dentro.

En los campos magnéticos se admite también que las líneas marchan de la parte norte a la parte sur.

Constantes de los imanes. Se llama *momento magnético* de un imán el producto de la masa m de uno de sus polos por la longitud l de la barra

$$\mathbf{A} = ml$$

Intensidad de imantación de un imán es la relación de su momento magnético y su volumen v

$$\mathbf{Y} = \frac{\mathbf{A}}{v}$$

Densidad superficial de un polo magnético es la relación de su masa y su superficie s

$$\sigma = \frac{m}{s}$$

Si multiplicamos por l los dos términos de esta relación tendremos

$$\sigma = \frac{ml}{sl} = \frac{\mathbf{A}}{v} = \mathbf{Y}$$

luego, numéricamente, son iguales la densidad superficial y la intensidad de la imantación.

Oscilación de una barra imantada. Hemos dicho que si una barra imantada puede moverse libremente en un campo magnético se orienta siempre en una misma dirección. Pero la posición definitiva de la barra se alcanza sólo después de una serie de oscilaciones, de amplitud cada vez menor, en todo semejantes a las oscilaciones pendulares.

Las oscilaciones de la barra imantada, como las del péndulo, son *isócronas*, es decir, emplean el mismo tiempo cualquiera que sea su amplitud. Este isocronismo se aprovecha en algunos procedimientos de electrometría, y, por tanto, se ha calculado matemáticamente el tiempo empleado en cada una de las oscilaciones de una aguja imantada, obteniéndose la fórmula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Omega}{\mathbf{AH}}}$$

en la cual T es el tiempo; **A**, el momento magnético del imán; **H**, la intensidad del campo, y Ω, una constante que depende de la forma y dimensiones de la barra que oscila.

Imán laminar. Una hoja de hierro, cuyo espesor ε sea muy pequeño, comparado con su superficie, imantada de manera que presente sus polos en las caras, y no en los bordes, constituye un imán laminar u *hoja magnética*.

Se llama *potencia de una hoja magnética* el producto de su espesor por la densidad superficial de una de sus caras.

$$\mathbf{P} = \varepsilon\sigma$$

Si una hoja magnética se suspende de un hilo para que pueda moverse libremente, y se somete a la acción de un campo magnético cualquiera, el terrestre, por ejemplo, es evidente que, como imán que es, se orientará para poner sus caras norte y sur frente a las partes sur y norte del campo respectivamente. En un campo magnético se admite que las líneas de fuerza o flujo magnético marchan siempre de la parte norte a la parte sur; luego la facultad de orientación de una hoja magnética puede enunciarse así: *si una hoja magnética puede moverse libremente en un campo, se orientará buscando que el flujo entre por su cara sur.*

Este principio es de la mayor importancia.

Dos hojas magnéticas que puedan moverse se atraerán o se repelerán con tanta mayor fuerza cuanto mayores sean sus potencias. Luego la *energía relativa de dos hojas magnéticas* podrá expresarse por

$$G = MPP'$$

Al factor de proporcionalidad **M** se le llama *coeficiente de inducción mutua.*

Cuerpos magnéticos y diamagnéticos. Hasta ahora, al hablar de imantación, hemos supuesto siempre que las barras capaces de imantarse eran de hierro. No es exclusiva del hierro esta propiedad, sino que pueden también imantarse los derivados del hierro, como el acero y la fundición y aun otros cuerpos; el óxido magnético, el percloruro y el sulfato de hierro, etcétera, etc.

A todos estos cuerpos se les llama *magnéticos* o *ferromagnéticos,* y a los incapaces de imantarse, o que se imantan muy débilmente, se les llama diamagnéticos.

Permeabilidad magnética. El flujo magnético circula a través de los cuerpos magnéticos y de algunos diamagnéticos, entre estos últimos el aire.

Si pudiéramos contar el número de líneas de fuerza que atraviesan un centímetro cuadrado de hierro, de madera, de aire, etc., cuando todos estos cuerpos están sometidos a la acción de un mismo campo magnético, veríamos que este número es muy diferente para uno u otro cuerpo. Diremos, pues, que estos cuerpos tienen muy distinta permeabilidad magnética, es decir, distinta facultad de dejar pasar por su interior las líneas de fuerza del campo magnético en que están colocados.

El número de líneas de fuerza que pueden pasar por un centímetro cuadrado, de una substancia cualquiera, se llama *inducción magnética;* se representa por **B**, y la unidad que sirve para medirla es el *gausio*, la misma empleada para medir intensidades de campos magnéticos.

Comparando la inducción **B** de un cuerpo cualquiera con la intensidad del campo en que está situado, se obtiene un valor llamado *coeficiente de permeabilidad*, que se representa por μ. Se tiene

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}}$$

Podíamos también decir que coeficiente de permeabilidad de una substancia es la relación entre el número de líneas de fuerza, procedentes de un campo, que atraviesan un centímetro cuadrado de esta substancia, y el número de líneas de fuerza del mismo campo, que atraviesan un centímetro cuadrado de aire.

De aquí se deduce que *el coeficiente de permeabilidad para el aire es uno.*

Flujo magnético. El flujo de fuerza definido en general al estudiar las fuerzas newtonianas en el capítulo II, será en el caso particular de campos magnéticos

$$\mathbf{N} = \mathbf{H}s,$$

si circula por el aire, y

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}s$$

si circula por un cuerpo cualquiera con una inducción **B**; es decir, que *flujo magnético es el número total de líneas de fuerza que atraviesan una superficie cualquiera, de cualquier substancia, sometida a la acción de un campo.*

La unidad de flujo magnético se llama *maxvelio.*

Para dar idea de los valores de **B** y de **H** copiamos a continuación los correspondientes al hierro forjado y a la fundición gris, empleados por la casa Mather y Platt, según nota del formulario Hospitalier:

Hierro forjado recocido			Fundición gris		
H	B	μ	H	B	μ
2	5.000	2.500	5	4.000	800
4	9.000	2.250	10	5.000	500
5	10.000	2.000	21'5	6.000	279
6'5	11.000	1.692	42	7.000	166
8'5	12.000	1.412	80	8.000	100
12	13.000	1.083	127	9.000	71
17	14.000	823	188	10.000	53
28'5	15.000	526	292	11.000	37
52	16.000	308			
105	17.000	161			
200	18.000	90			
350	19.000	54			

Estudio de la imantación de un hierro. La definición del coeficiente de permeabilidad nos da

$$B = \mu H$$

Si μ fuese constante podríamos dar a un hierro una inducción **B** tan grande como quisiéramos, con tal de disponer de un campo **H** suficientemente intenso; pero a medida que **H** crece μ va disminuyendo, como puede verse en la tabla anterior, y el producto μ**H** no puede crecer a nuestro deseo.

En el estudio del electromagnetismo veremos que

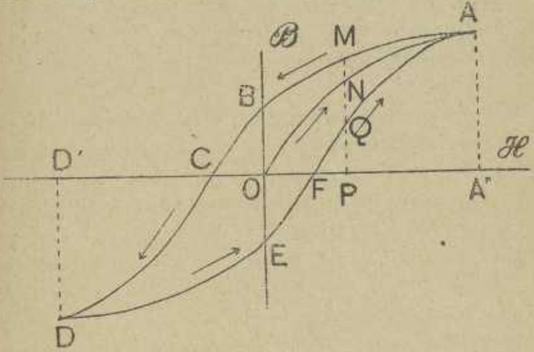


Fig. 8

es sencillísimo crear un campo magnético cuya intensidad aumente, disminuya o cambie de signo, completamente a gusto nuestro, y para estudiar la imantación de una barra de hierro debemos suponer que el campo inductor es de estas condiciones.

Para seguir fácilmente las variaciones de **B** y de **H** vamos a construir *un gráfico.*

Tracemos dos rectas perpendiculares *O*H y *O*B (figura 8) que se cortan en un punto *O*, que llamaremos origen de medidas.

En la recta horizontal *O*H tomaremos magnitudes *OF*, *OP*, *OA'*,... que sean proporcionales a las intensidades del campo que consideremos, y en el extremo de cada una de estas magnitudes levantaremos una perpendicular, cuya longitud sea proporcional a la inducción **B**, conseguida por la barra. De manera que, cuando la intensidad del campo inductor sea *OP*, por ejemplo, la inducción alcanzada por la barra sea *PN*.

Dando diversos valores a la intensidad **H**, y midiendo los valores correspondientes de la inducción **B**, determinaremos diversos puntos, como el *N*, que unidos nos darán una *curva de imantación* como la *ONA*, correspondiente a la muestra de hierro que se estudia.

Es evidente que mientras no haya campo (**H** = *o*) no habrá inducción (**B** = *o*), luego la curva de imantación pasa por el origen.

A medida que el campo aumente en intensidad la inducción irá también aumentando, pero sin proporcionalidad. Cuanto mayor es **H** más lento es el crecimiento de la curva. Se llega a un valor máximo *AA'* de la inducción, del cual no se pasa aun cuando siga aumentando la intensidad del campo. Se dice entonces que la barra está *saturada*, es decir que ya no admite mayor imantación.

Histeresis. Disponiendo libremente, como disponemos, de la intensidad del campo inductor, cuando hayamos llegado a la saturación de la barra, como final de la curva *ONA*, podremos disminuir gradualmente la intensidad, medir las inducciones correspondientes y trazar otra curva que podríamos llamar *de desimantación*.

Parecería natural que, al ir disminuyendo la intensidad del campo, encontrásemos para la inducción en la barra los mismos valores hallados primeramente, cuando íbamos aumentando la intensidad; o, de otro modo: parecería natural que la curva de desimantación coincidiese con la de imantación, pero no es así, y la curva de desimantación es, como la AMB, siempre más alta que la primera. De manera que, a una misma intensidad inductora OP corresponde una inducción PN o PM, según vayamos imantando o desimantando la barra.

Si la intensidad del campo inductor llega a ser cero, la imantación de la barra no es nula, si no que aun conserva un valor correspondiente a la altura OB, llamado *magnetismo remanente del hierro*. Para anular este magnetismo remanente es preciso someter la barra a la acción de un campo contrario del que la imantó, tal como OC, llamado *campo coercitivo*.

Invertido el sentido del campo inductor, si aumentamos gradualmente su intensidad, la barra se imanta nuevamente, pero en sentido contrario, es decir, presentando sus polos norte y sur donde antes los presentó sur y norte. El valor absoluto de la imantación de la barra crece como las alturas negativas de la curva CD, y llega también a un máximo $D'D$, del cual no pasa, y que corresponde igualmente a un estado de saturación del hierro.

Alcanzada la saturación en este sentido, desimantemos la barra e imantémosla nuevamente en el primitivo sentido, hasta volver a la primitiva saturación AA'.

La nueva curva será la $DEFQA$, que no coincide con ninguna de las anteriores, ni con la de primera imantación ONA, ni con la de primera desimantación $AMBCD$.

El resumen de todo lo anterior es que *el hierro se muestra perezoso para imantarse y para desimantarse, exigiendo un gasto de energía para cualquier cambio en su estado magnético.* A este fenómeno se llama *histeresis del hierro.*

Pérdida por histeresis. En la producción, transformación y utilización de la energía eléctrica se presenta muchas veces el caso de hierros que deben imantarse en sentidos contrarios rápidamente alternados. En tales condiciones, un hierro se calienta fuertemente, lo cual prueba que en su masa hay gran consumo de energía.

Esta pérdida de energía se calcula mediante la siguiente fórmula empírica debida a Steinmetz:

$$W = \eta f V \frac{\sqrt{\mathrm{B}^3}}{10^7}$$

en la cual significan:

W, las unidades de energía (vatios-segundos);

η, un coeficiente llamado de Steinmetz, que daremos luego;

f, la frecuencia con que el hierro sufre imantaciones en el mismo sentido, contado en veces por segundo;

V, el volumen del hierro en centímetros cúbicos;

B, la inducción máxima en gausios.

Valores de η

Hierro muy dulce	0,0020
Planchas de palastro	0,0026 a 0,0030
Acero fundido recocido	0,0040 a 0,0050
— dulce	0,0080 a 0,0120
— fundido templado	0,0250
Fundición ordinaria	0,0132

EJEMPLO. *La armadura de una máquina eléctrica está formada por láminas de palastro que alcanzan un volumen de 139.000 centímetros cúbicos, estando sometida a una inducción de 7.800 gausios y a una frecuencia de imantación de 25 veces por segundo. Calcular los vatios perdidos en esta armadura.*

Tomando para valor de η 0,0025, la fórmula anterior nos dará

$$W = 0{,}0025 \times 25 \times 139.000 \frac{\sqrt{7800^3}}{10^7}$$

y efectuando las operaciones indicadas, tendremos

$$W = 598 \text{ \textit{vatios por segundo}}$$

Ciclo magnético. Tomemos una barra imantada cuyo estado de imantación corresponda a la intensidad de campo inductor representada por OA' (figura 8), y a la inducción AA', es decir, cuyo estado de imantación quede representado por el punto A. Pudiendo variar a voluntad la intensidad del campo inductor nos será fácil, según hemos visto, desimantar la barra e imantarla en sentido contrario, para que el punto representante de su estado magnético recorra la curva $AMBCD$, y conseguido esto, variarle nuevamente la imantación para que el indicado punto recorra la curva $DEFQ$, hasta llegar al estado magnético primitivo, es decir, al punto de partida A. Se dice entonces que la *barra ha descrito un ciclo magnético completo.*

Examinando la curva correspondiente a un ciclo magnético completo se ve fácilmente que el área encerrada en ella puede hacerse menor, tomando los estados extremos de funcionamiento AA' y DD', más cerca del origen de distancias O. Esto es *cerrar un ciclo.*

Si un hierro se somete a imantaciones alternativas de manera que los ciclos sucesivos sean cada vez más cerrados hasta reducirse a un punto, la barra quedará completamente desimantada.

Deducido de esta observación, se aconseja un procedimiento para desimantar un reloj, cuando se ha imantado por haberse acercado a los polos magnéticos de una dínamo.

En las proximidades de la dínamo, es decir, en el campo inductor de sus polos, se suspende el reloj por la cadena, de manera que su eje sea vertical; se imprime al reloj un lento movimiento de rotación alrededor de su eje, y, a la vez, se retirará, lentamente también, de la dínamo. El movimiento de rotación hace que las piezas del reloj sufran un ciclo magnético completo durante cada revolución, y el alejamiento hace que la influencia del campo inductor sea cada vez menor, es decir, cierra gradualmente el ciclo hasta anularlo por completo.

Influencia del tiempo y de la temperatura. Se ve, por lo estudiado anteriormente, que se necesita cierto tiempo para que una barra de hierro sufra un ciclo magnético completo. Cabe entonces preguntarse, si sometiendo la barra a la acción de campos magnéticos que cambien de polaridad rapidísimamente, conseguiremos que el hierro no tenga tiempo de cambiar su imantación, es decir, no tenga tiempo de describir su ciclo magnético, y, por tanto, no presente efecto alguno de histeresis.

Parece que está ya fuera de toda duda que el hierro necesita cierto tiempo para invertir su imantación, y aun para imantarse por primera vez en un sentido cualquiera.

En las dínamos generadoras de corriente eléctrica, donde haya masas de hierro sometidas a la acción de campos de polaridad variable, la frecuencia de la variación es insuficiente para poder apreciar el tiempo empleado por el hierro en imantarse y desimantarse. Pero en un núcleo de hierro dulce perfectamente neutro, sometido a la acción de un campo inductor cuya intensidad no llegue a un gausio, se observa que la imantación que puede alcanzarse, no se consigue hasta después de algunos segundos.

Al construir aparatos telegráficos, que han de funcionar con imantaciones mínimas, conviene imantar los núcleos antes de ponerlos en servicio; podríamos decir que conviene *acostumbrarlos a la imantación.*

Otro efecto notable sobre la imantación de una barra sometida a un campo magnético es la temperatura a que se encuentra el material de la barra.

Cuando el campo es muy débil, la imantación crece con la temperatura hasta alcanzar una temperatura crítica, más allá de la cual la imantación decrece bruscamente.

De esta propiedad se deduce otro procedimiento para desimantar un objeto imantado; basta para ello calentar el objeto hasta ponerlo rojo, pues a esta temperatura desaparece la imantación adquirida.

Cuando los campos inductores son más intensos, puede decirse, en términos generales, que *los cuerpos se imantan menos cuanto más calientes están.*

Conforme con esta idea, Faraday creía que todos los cuerpos pueden imantarse con tal de que se hallen a temperatura suficientemente baja; y en apoyo de tal hipótesis, se citan dos hechos notables: el oxígeno líquido es cuerpo magnético, y la liga de hierro y níquel no presenta propiedades magnéticas mientras su temperatura no desciende por debajo de los cero grados.

Pantallas magnéticas. Si en un campo magnético se coloca una caja hueca, cerrada, y cuyas paredes sean de hierro de algún espesor, las líneas de fuerza que lleguen a la caja marcharán por las paredes hasta salir de ella, mejor que atravesar el interior que les ofrece un camino de aire, mucho menos permeable que el hierro de las paredes.

Con paredes de espesor suficiente, o con varias cajas superpuestas, siempre podrá conseguirse que el interior esté absolutamente resguardado de las líneas de fuerza del campo. Esta protección constituye una verdadera pantalla magnética.

Los aparatos de medición, como amperímetros y voltímetros, que deben funcionar en las proximidades de campos magnéticos intensos, conviene que vayan encerrados en cajas de hierro de algún espesor, que, ejerciendo de pantallas magnéticas, libren sus órganos sensibles de las influencias exteriores.

El galvanómetro marino, que debe funcionar a bordo y, por tanto, rodeado de grandes masas de hierro, está también recubierto de una pantalla magnética.

CAPITULO IV

Electrostática

Cuerpos electrizados. Hemos dicho ya (capítulo II) que frotando un cilindro de lacre o vidrio con un paño de lana adquiere la propiedad de atraer los cuerpos ligeros, como son pedacitos de papel o barbas de pluma, y en tal estado se dice que el cuerpo está electrizado.

Siempre que se habla de este procedimiento de electrización se aconseja el lacre, el vidrio o la resina, para repetir el experimento, como si los demás cuerpos no fuesen aptos para electrizarse por frotamiento.

Así lo creyeron los antiguos, clasificando con este motivo los cuerpos en dos grupos, que llamaron *idioeléctricos* o electrizables y *aneléctricos* o no electrizables. Dufay fué el primero que demostró que todos los cuerpos podían electrizarse por frotamiento, y que si los cuerpos metálicos no daban señales de electrización era porque el flúido desarrollado se perdía a través del cuerpo del operador. En efecto; tomando un cilindro de metal y poniéndole un mango de vidrio, da señales de electrización, cuando se le frota sostenido por este mango.

Hoy está fuera de duda que se electrizan hasta los líquidos; en esta propiedad está fundado el anticohesor Shaffer, que se emplea en telegrafía sin hilos.

Conductores y aisladores. La verdadera clasificación que debe hacerse de los cuerpos, por su manera de portarse con la Electricidad, es en cuerpos buenos y malos conductores de la electricidad, respectivamente, llamados conductores y aisladores.

Entre los buenos conductores están los metales, el carbón, las disoluciones salinas, el agua, el cuerpo del hombre, el aire húmedo y el suelo. Entre los malos conductores se cuentan las gomas, las resinas, el azufre, el vidrio, la seda, la porcelana, el mármol, la madera seca y el aire seco.

Electricidad estática y dinámica. Llamaremos estática a la electricidad que permanece estacionada en la superficie de un conductor, por no tener camino por donde marcharse descargando el conductor. Es claro que si un cuerpo electrizado se une mediante un hilo metálico a otro cuerpo no electrizado, la carga del primero se reparte entre los dos, y para ello corre un instante a lo largo del hilo metálico. En este instante la electricidad se hace *dinámica*.

Si por un procedimiento cualquiera, de los que más adelante veremos, conseguimos que la carga del primer conductor sea siempre superior a la del segundo, la electricidad marchará de un modo continuo a lo largo del hilo metálico, constituyendo una *corriente eléctrica*.

Como se ve, la electricidad es una, y se presenta en forma estática o dinámica, según las circunstancias. En las aplicaciones veremos muchos casos en que una corriente eléctrica produce cargas estáticas, y, recíprocamente, una carga estática da lugar a una corriente de mayor o menor duración.

En la electricidad, como en el magnetismo, hemos dicho ya que las masas activas tienen dos modos de existencia directamente contrarios, por lo cual a unas se les llama positivas y a otras negativas. Si considerásemos, como en álgebra, las cantidades positivas mayores que las negativas, podríamos decir que cuando dos conductores se unen mediante un hilo metálico, la corriente eléctrica que se establece marcha siempre de la masa mayor a la menor, y circula hasta que ambas masas se hacen iguales a su semisuma algebraica.

Si uno de los conductores unidos mediante el hilo metálico está cargado positivamente y el otro descargado, la corriente circulará del cargado al descargado; pero si uno de los conductores está cargado negativamente y el otro descargado, la corriente marchará del descargado al cargado.

Leyes de la electricidad estática. Las acciones eléctricas son fuerzas newtonianas y, por tanto, sus efectos atractivos o repulsivos obedecen a la fórmula

$$f = \frac{qq'}{r^2}$$

Llamaremos unidad de electricidad a la cantidad q, que actuando sobre otra igual, situada a la unidad de distancia, produce la unidad de fuerza repulsiva. A la unidad práctica de cantidad de electricidad se le llama *culombio*.

Escogida la unidad se podrán medir por comparación las cantidades de electricidad que un cuerpo posee, o sea su *masa o carga eléctrica*.

Campo eléctrico es el espacio en que son perceptibles las acciones eléctricas, y quedará definido en uno de sus puntos por la intensidad y dirección de la resultante de todas las acciones eléctricas que sufre la unidad de masa positiva colocada en aquel punto.

La distribución de un campo eléctrico en el espacio puede ponerse de manifiesto mediante el espectro eléctrico, análogo al espectro magnético descrito en el capítulo III, y que se experimenta de igual modo, sin más que substituir las limaduras de hierro por polvo de licopodio.

Si el campo está creado por una sola masa q, la intensidad a la distancia r tendrá por expresión

$$\mathrm{H} = \frac{q}{r^2}$$

Potencial eléctrico de una masa situada en un campo, es el trabajo que podrá realizar esta masa cuanpo pueda moverse libremente. Se representa por

$$V = \Sigma \frac{q}{r}$$

Si el campo es debido a una sola masa q, el potencial será

$$V = \frac{q}{r}$$

Esta expresión permite modificar la de la intensidad del campo, establecida en el párrafo anterior. Tendremos:

$$\mathrm{H} = \frac{q}{r^2} = \frac{q}{r} : r = V : r$$

Superficies equipotenciales son las formadas por puntos del campo, que tienen todos el mismo potencial eléctrico.

Líneas de fuerza serán las líneas que corten ortogonalmente a todas las superficies equipotenciales del campo.

Conductor en equilibrio. Un conductor electrizado y perfectamente aislado, para que no pueda descargarse, se dice que está en equilibrio. *La carga de*

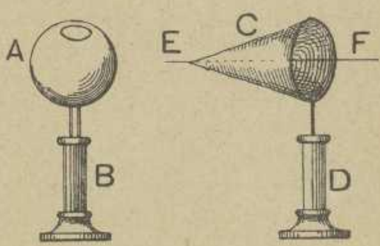


Fig. 9

un conductor en equilibrio permanece siempre en su superficie y no en el interior de su masa.

Para demostrarlo se electriza una esfera metálica hueca, *A* (fig. 9), sostenida por un pie de vidrio *B*, y con un orificio para poder tocar la superficie interior. Si con un cuerpo aislador, una barra de lacre, por ejemplo, se toca la superficie exterior de la esfera, el lacre queda electrizado y atrae los cuerpos ligeros como si se hubiera frotado. Si se toca la superficie interior, el lacre no da señal alguna de electrización.

Todavía se hace un experimento más concluyente. Se dispone una manga cónica de seda, *C*, sostenida por un pie aislador, *D*, y mantenida en la posición del dibujo mediante la tensión de un hilo, *EF*. Electrizada esta manga, pueden hacerse iguales pruebas que con la esfera hueca. Pero mediante el hilo *EF*, podemos invertir la manga de manera que su vértice pase a la derecha del dibujo, es decir, de manera que sea superficie exterior la que anteriormente era interior. Probando nuevamente con la barra de lacre encontraremos la carga en la superficie que es ahora exterior.

Una consecuencia interesante se deduce de aquí. Si la carga eléctrica de un cuerpo permanece en su superficie no ejercerá acción alguna sobre un punto activo interior y, por tanto, este punto activo tendrá el mismo potencial en cualquier situación, siempre que no salga del interior de la superficie. Resulta que todo el espacio interior es equipotencial, y aun la misma superficie lo es también; luego *una superficie cargada es equipotencial en el campo eléctrico que ella misma crea.*

Potencial de la tierra. Al estudiar la electricidad como una forma de la energía, nos interesa siempre determinar el trabajo realizable o realizado por una masa eléctrica moviéndose en un campo de fuerza. La expresión de este trabajo depende, como ya sabemos, de una diferencia de potenciales; luego en el estudio de la electricidad manejaremos siempre diferencias de potencial y no potenciales absolutos.

Para medir diferencias podemos escoger libremente el término de comparación y referir a él los potenciales de todos los demás conductores. Se ha fijado como término de comparación, es decir, como conductor de potencial nulo, la tierra.

Diremos, pues, que *el potencial de la tierra es cero*, y que los potenciales de los demás conductores electrizados son positivos o negativos, es decir, superiores o inferiores al de la tierra.

Un conductor electrizado, en comunicación con el suelo, dará lugar a una corriente que marchará del conductor al suelo o del suelo al conductor, según que la carga de éste sea positiva o negativa.

Presión superficial. Como en el estudio general de las fuerzas newtonianas, hecho en el capítulo II, llamaremos presión superficial o presión electrostática a la acción repulsiva que ejerce la masa eléctrica total contenida en una superficie electrizada, sobre la masa contenida en la unidad de superficie.

Decimos *acción repulsiva*, porque es evidente que en una superficie electrizada cada uno de sus elementos de carga es repelido por todos los demás, por ser del mismo signo.

La presión electrostática p se expresa como función de la densidad superficial σ, o como función de la intensidad **H** del campo eléctrico en el punto considerado. Las fórmulas correspondientes son:

$$p = 2\sigma\pi^2 \quad \text{y} \quad p = \frac{\mathbf{H}^2}{8\pi}$$

Poder de las puntas. Si una superficie s, está cargada con una densidad σ, es evidente que su carga total o cantidad de electricidad contenida, será

$$q = s\sigma$$

Si la superficie es esférica, es decir, de curvatura uniforme, la densidad σ es constante en todos sus puntos; pero si la superficie tiene distintas curvaturas en sus diferentes puntos, *la densidad superficial es directamente proporcional a la curvatura, o sea inversamente proporcional al radio de la superficie.*

Una punta aguda de un conductor es una superficie curva de radio nulo; luego en la punta aguda la densidad tiende a ser infinita, y como la carga del conductor no es infinita, *la punta aguda descarga el conductor electrizado.*

Pantallas eléctricas. Un conductor hueco, metálico, colocado en un campo eléctrico, se electriza por la influencia del campo; pero la carga que adquiere se mantiene en su superficie únicamente y, por tanto, no ejerce acción alguna sobre un punto situado dentro del conductor.

Si aumenta la intensidad del campo inductor aumentará la densidad superficial de la carga en el conductor metálico hueco; pero seguirá sin acción sobre los puntos interiores, siendo el conductor para ellos una verdadera pantalla eléctrica.

Para conseguir esta protección de un espacio limitado contra la acción del campo exterior no precisa que el conductor-pantalla sea absolutamente continuo; basta sencillamente una tela metálica de anchas mallas.

El *poder de las puntas* y las propiedades de las *pantallas eléctricas* constituyen los fundamentos de los dos únicos tipos de pararrayos empleados para preservar los edificios de los destructores efectos de las descargas eléctricas atmosféricas. No entraremos aquí en esta materia, porque ya se trata extensamente en el tomo XV de esta Biblioteca.

Electrización por inducción. Un cuerpo conductor influído por la proximidad de un cuerpo electrizado, se electriza también sin necesidad de establecer contacto metálico entre ambos.

Sea AB (fig. 10) un cilindro metálico no electrizado y provisto en las proximidades de sus extremos y en su medio de pendulillos eléctricos, es decir, de hilos flexibles, que llevan en sus extremos unas bolitas de medula de saúco.

Aproximemos al cilindro una esfera metálica *C*, electrizada con un signo cualquiera, positivamente, por ejemplo.

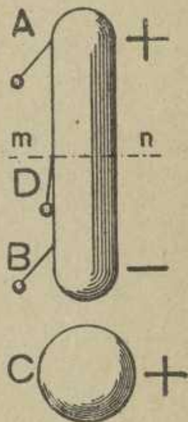


Fig. 10

En cuanto la esfera esté próxima al cilindro los pendulillos divergen, indicando que sufren una repulsión por parte del cilindro, lo cual es sencillamente un efecto de presión electrostática y prueba evidente de que el cilindro está electrizado.

Con el auxilio de las barras de lacre y de vidrio, electrizadas por frotamiento, podemos precisar los signos de las cargas eléctricas aparecidas en los extremos *A* y *B* del cilindro, y observaremos que en el extremo *B*, más próximo a la esfera electrizada, aparece una masa de signo contrario a la de la esfera, y en el extremo *A*, más distante, la masa tiene el mismo signo que la de la esfera.

El pendulillo *B*, situado en la región media, no diverge; por tanto, en esta parte del cilindro no hay electrización.

Esta distribución de las masas eléctricas sobre el cilindro metálico, le asemejan a una barra imantada con sus polos de efecto máximo en los extremos y su región neutra de efecto nulo en el centro. Hay, sin embargo, una diferencia notable entre el cilindro electrizado y la barra imantada. El conductor electrizado puede estarlo en todas sus partes con el mismo signo; tal sucede en la esfera *C*. La barra imantada ha de presentar forzosamente las imantaciones simultáneas de los dos signos. Dicho de otro modo: se concibe la existencia de una masa eléctrica positiva, sola, con independencia de toda otra masa negativa; pero no se concibe la existencia de una masa magnética boreal sin la existencia de otra masa igual en cantidad, pero austral.

Continuemos estudiando la electrización por influencia.

Cuando tenemos los pendulillos inclinados, indicando la existencia de masas eléctricas, alejemos la esfera *C*, o descarguémosla poniéndola en comunicación con el suelo. Los pendulillos caen en el acto sobre el cilindro, porque las masas eléctricas, sin causa alguna que las mantenga separadas, irán una hacia otra recomponiendo el estado neutro, es decir, dando una resultante nula.

Procedamos de otro modo. Mientras tenemos los pendulillos inclinados cortemos el cilindro por la recta *mn*, es decir, separemos las dos mitades de que le suponemos formado. Retirando luego la esfera, los pendulillos subsisten inclinados; la recomposición de las masas eléctricas no se ha efectuado, porque hemos cortado el camino para que vayan la una hacia la otra. En las dos mitades del cilindro tenemos dos masas eléctricas separadas, dispuestas a unirse, efectuando un trabajo, en cuanto se les ponga en condiciones apropiadas para realizarlo.

Finalmente, cuando tenemos los pendulillos separados, en lugar de llevarnos la masa positiva, partiendo el cilindro como acabamos de decir, limitémonos a poner en comunicación con el suelo el extremo *A* del cilindro. Desaparecerá la carga positiva, y aun cuando alejemos o descarguemos la esfera, el cilindro quedará electrizado negativamente, porque la carga negativa no encuentra carga positiva con la cual recomponerse para dar nuevamente el estado neutro.

Descargas conductivas y disruptivas. Hemos dicho ya que si dos cuerpos electrizados con masas distintas se reúnen por un conductor metálico, este conductor resulta atravesado por una corriente o transporte de masa eléctrica que tiende a igualar las cargas de los dos cuerpos unidos. Esta igualación de cargas es un medio de descargar un conductor, y constituye la *descarga conductiva*, que estudiaremos con todo detenimiento en la electrodinámica.

Un cuerpo fuertemente electrizado, observado en la obscuridad, parece rodeado de una aureola luminosa, tanto mayor cuanto mayor sea la pérdida de carga que el cuerpo sufra. Esta pérdida puede exagerarse cuando el cuerpo está en comunicación con un buen generador de electricidad, armando su superficie de una punta aguda, en la cual aparece un brillante penacho luminoso.

La carga del conductor desaparece por este medio y se dice entonces que ha sufrido una *descarga disruptiva lenta.*

Cuando dos conductores tienen cargas muy diferentes y se hallan muy próximos uno a otro, la descarga eléctrica tiene lugar en forma de chispa, constituyendo una verdadera explosión, acompañada de efecto luminoso y de ruido.

A esta descarga se le llama *descarga disruptiva brusca* o chispa eléctrica.

Máquinas eléctricas. Todo instrumento destinado a producir electricidad se denomina máquina eléctrica.

La electricidad estática engendrada por estas máquinas no tiene aplicación en la industria eléctrica; y como procuramos dar carácter industrial a los tomos de esta Biblioteca, no tiene para nosotros la máquina electrostática la importancia que tienen otras máquinas generadoras o receptoras que estudiaremos luego.

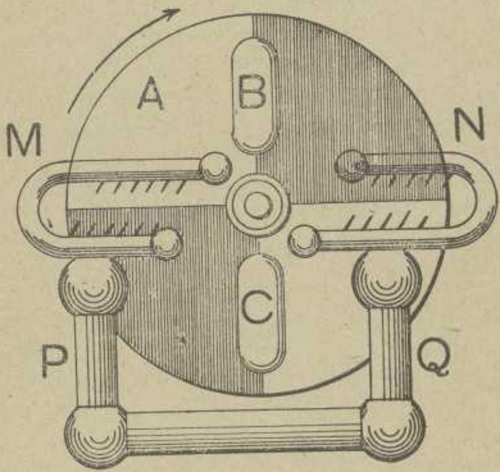


Fig. 11

Para no prescindir en absoluto de los generadores de electricidad estática, describiremos la máquina de Ramsden, o máquina de disco, que es de las más empleadas y de funcionamiento más sencillo.

Esencialmente consta de un disco de vidrio *A* (fig. 11), que mediante una manivela gira frotando con dos juegos de almohadillas *B* y *C*, electrizándose, por tanto, positivamente. Las almohadillas están en comunicación con el suelo. Al girar el disco, el sector que se electriza por frotar con las almohadillas, pasa por entre dos piezas *MN* erizadas de puntas.

El flúido neutro de los conductores *MP* y *NQ* se descompone, marchando el negativo hacia los peines y el positivo hacia los extremos opuestos. Pero el flúido negativo se escapa por las puntas para neutralizar el positivo del disco, quedando los conductores *MP* y *NQ* electrizados positivamente.

Para evitar que el sector electrizado por frotamiento se descargue a través del aire, antes de llegar a los peines, se ponen dos protecciones de tafetán engrasado, en forma de cuadrantes de círculo, que recubran el disco entre las almohadillas y los peines, según el sentido de la rotación.

Todas las piezas metálicas *M*, *N*, *P*, *Q*, lo mismo que los soportes del eje del disco, van sostenidos por pies de vidrio, barnizados a la laca, con objeto de evitar las pérdidas a tierra.

CAPITULO V

Condensadores

Capacidad de un conductor. Para darnos cuenta exacta de lo que significa la capacidad, consideremos un hecho vulgar. En un recipiente cualquiera, en una botella, por ejemplo, nos proponemos almacenar un gas mediante el auxilio de una bomba. La cantidad q de gas que lograremos introducir dependerá en primer lugar de la *capacidad* c de la botella, y en segundo lugar de la presión V con que le inyectemos. Tendremos, pues,

$$q = cV$$

Del mismo modo, la cantidad de electricidad q que un cuerpo puede almacenar, depende de su forma y dimensiones, y es proporcional al potencial V a que se halle sometido. Llamando c a la constante de proporcionalidad, tendremos la cantidad de electricidad expresada mediante la misma fórmula que representa la cantidad de gas contenido en la botella que considerábamos en el ejemplo vulgar:

$$q = cV \qquad [1]$$

de donde

$$c = \frac{q}{V}$$

Según esta fórmula, llamaremos *capacidad eléctrica de un conductor a la relación entre la cantidad de electricidad que almacena y el potencial a que se sometió para almacenarla.*

La unidad práctica de cantidad se llama *culombio*; la de potencial, *voltio*, y la de capacidad, *faradio*. De manera que

$$\textit{un faradio} = \frac{\textit{un culombio}}{\textit{un voltio}}$$

Esta relación sencilla ha conducido a los electricistas a aceptar el faradio como unidad de capacidad; pero tal unidad resulta excesivamente grande para las necesidades de la práctica, y obliga a expresar las capacidades de los conductores y aparatos usuales en *microfaradios*, o sea millonésimas de faradio.

Condensadores. La capacidad de un conductor metálico, cualesquiera que sean su forma y dimensiones, es siempre pequeña, y para almacenar cantidades de electricidad de alguna importancia ha sido preciso recurrir a la construcción de aparatos especiales llamados *condensadores*.

La idea de los primeros condensadores data del año 1745. Von Klist, obispo de Pomerania, trataba de electrizar el mercurio contenido en una botella, y para ello tomó la botella en una mano y puso el mercurio en comunicación con un generador de electricidad mediante un conductor metálico. Manteniendo la botella en una mano tocó por descuido con la otra el conductor unido al mercurio y sufrió una violenta conmoción, muy superior a lo que podía esperarse del generador empleado.

Cuneus y Musschenbroek, de Leyden, repitieron el fenómeno y lo estudiaron en circunstancias muy variadas, dando lugar a la construcción y teoría de los condensadores.

En el experimento de Von Klist, la condensación se verificó teniendo un cuerpo buen conductor, el mercurio, unido al generador eléctrico, y otro conductor, el cuerpo del experimentador, unido a tierra, es decir, mantenido a un potencial constante. Ambos cuerpos conductores estaban separados por un aislador, que era el vidrio de la botella. Del mismo modo están constituídos los actuales condensadores; todos tiene dos cuerpos conductores llamados *armaduras*, separados por un cuerpo aislador llamado dieléctrico.

La descarga de un condensador se verifica uniendo metálicamente sus armaduras.

Condensador de Œpinus. El más sencillo de los condensadores es el de Œpinus, representado en la figura 12. Se reduce al sistema de dos cuerpos conductores *A* y *B*, situados uno cerca del otro, como los considerados en la figura 10, cuando estudiábamos la electrización por inducción.

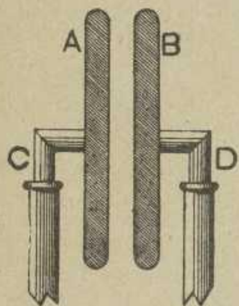


Fig. 12

La forma de los conductores es aquí la de platillos circulares, con los cantos redondeados para evitar las pérdidas, y el dieléctrico empleado es el aire existente entre ellos. Las armaduras van sostenidas por soportes aisladores *C*, *D*, y tienen dispositivos sencillos para poner uno en comunicación con el generador de electricidad y otro en comunicación con el suelo.

El funcionamiento de condensación es exactamente el mismo funcionamiento de carga estudiado en el sistema de esfera y cilindro de la figura 10, cuando suponíamos que después de cargado el cilindro le quitábamos su carga positiva mediante una comunicación con tierra de su extremo *A*.

Botella de Leyden. Este condensador, por su forma y por su constitución, es una reproducción mejorada de la primitiva botella con que operó Von Klist. La figura 13 representa una sección de la botella de Leyden. La armadura interior, en lugar de ser de mercurio, está formada por una multitud de recortes de hojas metálicas muy finas, panes de oro o papel de estaño, con objeto de aumentar su superficie. La armadura exterior está igualmente constituída por una hoja metálica pegada a la superficie de la botella, con lo cual se facilita su comunicación eléctrica con el suelo.

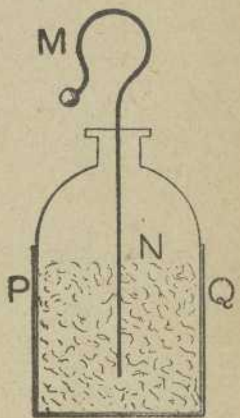


Fig. 13

A fin de que las armaduras no puedan comunicarse mediante la humedad del aire condensado en el vidrio, se recubre la parte superior y cuello de la botella de lacre o de un barniz aislador cualquiera.

Otro tipo de botellas de Leyden tiene su armadura interior formada, como la exterior, por una lámina metálica pegada al vidrio. De esta clase son los condensadores empleados hoy en las instalaciones de protección de redes eléctricas y en las estaciones radiotelegráficas de gran alcance. En unos y otros suele substituirse la forma de botella por la de tubo cilíndrico de poco diámetro y mucha altura.

Función del dieléctrico en la condensación. Los experimentos realizados parecen demostrar que la electricidad almacenada en un condensador reside precisamente en el dieléctrico. Para probarlo se toma una botella de Leyden y se substituyen los recortes metálicos de su armadura interior por un líquido conductor, agua acidulada, mercurio, etc. Cuando la botella está cargada se quita el líquido interior, substituyéndolo por otro nuevo, y la botella sigue dando señales de electrización.

Condensadores industriales. En la aplicación de los condensadores a las máquinas e instalaciones eléctricas, se emplean condensadores de formas sencillas, reducidas generalmente a una de las tres siguientes:

Condensador plano, cuyas armaduras son láminas metálicas planas, de forma y dimensiones variables según la capacidad deseada.

Condensador cilíndrico, cuyas armaduras son dos superficies cilíndricas, concéntricas, de igual altura.

Condensador esférico, cuyas armaduras son dos superficies esféricas concéntricas.

En todos ellos se suponen las armaduras metálicas bastante próximas para poder despreciar su distancia comparada con las superficies.

Suponiendo que las armaduras no tengan entre sí más aislador que el aire, la capacidad de uno cualquiera de estos condensadores se calcula mediante la fórmula

$$c = \frac{884s}{10^{10}d}$$

siendo c, la capacidad en microfaradios; s, la superficie de una armadura en centímetros cuadrados; d, la distancia en centímetros entre las armaduras.

Capacidad inductiva específica. La fórmula anterior se establece suponiendo que el dieléctrico que separa las armaduras es el aire. Empleando en lugar del aire otro dieléctrico, la capacidad se hace k veces mayor y la fórmula se convertirá en

$$c = \frac{884}{10^{10}} k \frac{s}{d}$$

El coeficiente k se llama capacidad inductiva específica, o poder inductor específico del dieléctrico.

En los dieléctricos transparentes se verifica que sus coeficientes de capacidad específica son proporcionales a sus índices de refracción. Es notabilísima esta relación entre las propiedades eléctricas y ópticas de un cuerpo, y es un argumento más en favor de la energía única de que hablábamos en el capítulo primero.

Los valores de k para las substancias empleadas como dieléctricos en los condensadores industriales, son los siguientes:

Valores de k

Caucho	2'2
— vulcanizado	2'7
Vidrio crown	7
Cristal	6'7
Cera amarilla	1'8
Fibra gris	1'2
— roja	1'4
— negra	2'7
Ebonita	2'4
Gutapercha	4'1
Mica	5'8
Parafina	2'2
Resina	2'5
Azufre	3'2

Capacidad de líneas y aparatos eléctricos. En la construcción de líneas y aparatos eléctricos quedan muchas veces los elementos conductores y los elementos aisladores dispuestos en formas tales que constituyen verdaderos condensadores, cuyas capacidades llegan a tener gran importancia y son, en general, perjudiciales para el buen funcionamiento de aquéllos.

Entre los casos más notables de capacidades no buscadas está el de las líneas eléctricas enterradas o sumergidas en el agua. Estas se hallan constituídas por un núcleo o alma conductora, una capa aisladora y un tubo metálico protector. El núcleo y el tubo protector forman las dos armaduras metálicas, y la envoltura intermedia aisladora forma el dieléctrico. En conjunto es exactamente un condensador cilíndrico.

Cuando se trata de líneas de esta clase tan largas como lo son los cables telegráficos submarinos, por ejemplo, la superficie de sus armaduras crece notablemente, aun teniendo pequeño diámetro, por su extraordinaria longitud. La capacidad c llega a ser importante, y la cantidad de electricidad q almacenada lo es también, aun cuando se emita con generadores de escasísimo potencial. Después de transmitir un signo hay que dar al cable o tiempo o carga de signo contrario, para conseguir su total descarga antes de emitir un nuevo signo. Las líneas de transmisión de energía, enterradas, presentan también notables efectos de capacidad, pues aun cuando no alcanzan la longitud de un cable eléctrico submarino, tiene su alma mucho mayor diámetro, y su carga se efectúa a mayores voltajes. La capacidad de estas líneas es causa de ciertos fenómenos llamados de resonancia, que estudiaremos en lugar oportuno y que producen a veces grandes trastornos.

Las líneas aéreas presentan siempre menores efectos de capacidad que las enterradas, y cuando su aislamiento no es muy esmerado, como sucede generalmente con las líneas telegráficas ordinarias, pierden su carga por los soportes en el mismo momento que la reciben y no producen efecto alguno de capacidad.

En las líneas que se construyen actualmente para grandes tensiones o voltajes el aislamiento permite observar fenómenos de capacidad bastante importantes.

Si la línea es de un solo conductor, podrá considerarse su capacidad como debida a la presencia de un cilindro metálico, que es el conductor, y un plano que es el suelo. La capacidad del sistema viene dada por la fórmula

$$c = \frac{l}{log. \frac{4r}{d}} \times \frac{1}{1.800.000} \, microf.$$

siendo l la longitud del cilindro; r, su radio; d, la separación entre el cilindro y el suelo, y *log.*, la indicación de logaritmo neperiano.

Si la línea es de dos conductores, el efecto de capacidad más importante es el debido a la existencia de los dos cilindros metálicos paralelos, y puede calcularse mediante la fórmula de Pomey

$$c = \frac{l}{log.\left(a + \sqrt{a^2 - 1}\right)} \times \frac{1}{1.800.000} \, microf.$$

en la cual a viene dado por la fracción

$$a = \frac{d^2 - r^2 - r'^2}{2rr'}$$

siendo d la distancia entre los hilos, en centímetros, y r y r' los radios de los conductores.

Leo Lichtenstein simplifica las fórmulas despreciando los radios r y r' comparados con la distancia d de los conductores. Nosotros admitimos esta simplificación y, además, hemos calculado el coeficiente numérico para poder emplear logaritmos vulgares en lugar de los neperianos que se indican en la fórmula.

La capacidad de una línea de dos conductores viene dada por

$$c = 0'012 \frac{l}{log.\frac{d}{r}}$$

y la de una línea de tres conductores

$$c = 0'024 \frac{l}{log.\frac{d}{r}}$$

expresándose d y r en centímetros; l, en kilómetros, y c, en microfaradios.

Acoplamiento de condensadores en paralela. Cuando el efecto de un solo condensador es insuficiente para el objeto deseado, se agrupan varios condensadores, en paralela o en serie, según el fin que se persiga.

El acoplamiento en paralela se obtiene uniendo

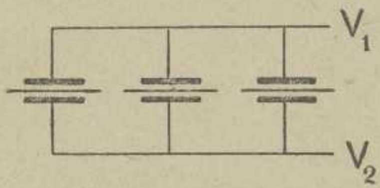


Fig. 14

todas las armaduras de un lado de los condensadores para formar un terminal de la batería, y uniendo todas las segundas armaduras para formar el otro terminal.

En la figura 14 se representa esquemáticamente la unión entre los diversos condensadores acoplados en paralela.

Es evidente que la diferencia de potencial que carga los condensadores es para todos $V_1 - V_2$.

Las cantidades de electricidad que acumularán serán proporcionales a sus capacidades respectivas y tendremos para cada uno de ellos, fórmula (1),

$$q_1 = c_1 (V_1 - V_2)$$
$$q_2 = c_2 (V_1 - V_2)$$
$$q_3 = c_3 (V_1 - V_2)$$
$$\cdots\cdots\cdots$$

y sumando miembro a miembro estas igualdades, tendremos la cantidad total de electricidad acumulada por la batería,

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots = (c_1 + c_2 + c_2 + \dots)\,(V_1 - V_2)$$

Comparando este resultado con la fórmula (1) se observa que la capacidad del sistema está representada en él por el paréntesis que encierra la suma de capacidades, lo cual nos dice que *una batería formada por varios condensadores unidos en paralela equivale a un solo condensador, cuya capacidad sea la suma de las capacidades de los componentes y cuya tensión de carga o descarga sea la misma que la de uno de los condensadores componentes.*

Si la batería estuviera formada por n condensadores iguales, de capacidad c, y tensiones de carga y descarga $V_1 - V_2$, la cantidad de electricidad sería

$$Q = nc\,(V_1 - V_2)$$

Como se ve, con este montaje se gana cantidad de electricidad; por eso a la conexión en paralela se le llama también *conexión en cantidad.*

El resultado obtenido con la asociación de condensadores en paralela evita el empleo de grandes superficies de armaduras, que serían difíciles de obtener y muy molestas de manejar.

Por otra parte, la capacidad de un condensador no depende de la masa metálica de sus armaduras, y sí únicamente de su superficie.

Teniendo en cuenta estas observaciones, cuando el cálculo de un condensador exige el empleo de una superficie grande, como sucede con los usados en telegrafía, se construyen sus armaduras de hojas finas de papel de estaño, apiladas unas sobre otras, y separadas por hojas intermedias de mica o de papel parafinado. Se reúnen todas las hojas de orden par para formar una armadura, y todas las de orden impar para formar la otra, como se indica esquemáticamente en la figura 15.

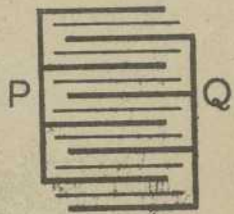


Fig. 15

Con esta disposición puede contarse como superficie activa de la armadura las dos caras de cada hoja de estaño.

Los condensadores empleados en electrometría pueden variar su capacidad mediante sencillas disposiciones, tales como la representada esquemáticamente en la figura 16.

Una armadura está constituída por todas las hojas

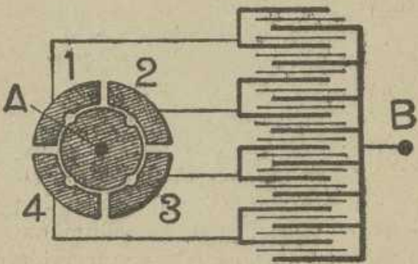


Fig. 16

metálicas de orden par, unidas de un modo permanente al borne de empalme *B*. La otra armadura está dividida en secciones completamente independientes unas de otras, comunicando con sectores metálicos 1, 2, 3, 4, situados en la parte exterior del aparato, rodeando a un bloque central *A*, en donde va el segundo borne de empalme.

Entre los sectores y el bloque central pueden ajustarse clavijas metálicas en escotaduras apropiadas, para establecer seguros contactos.

Supongamos, por ejemplo, que cada una de las secciones de la armadura dividida corresponde a una capacidad de 0,25 microfaradios. Poniendo una clavija en el bloque 1, tendremos entre *A* y *B* 0,25 microfaradios; poniendo clavijas en los bloques 1 y 2 tendremos 0,50 microfaradios, y así sucesivamente.

Fig. 17

La figura 17 representa, en conjunto, un condensador de esta clase, construído por la casa J. Carpentier, de París (Ateliers Ruhmkorff).

Existe algún tipo de condensadores empleados en telegrafía sin hijos y en las instalaciones de protección de redes que tienen forma de tubos, siendo su armadura interior una capa de plata depositada en el vidrio, y su armadura exterior un líquido conductor en el cual va sumergido el tubo. En estos modelos se gradúa fácilmente la capacidad, sumergiendo más o menos el tubo en el líquido exterior.

Acoplamiento de condensadores en serie. El acoplamiento en serie se obtiene uniendo la segunda armadura de cada condensador con la primera del siguiente. Quedarán libres, como terminales de la batería, la primera armadura del primero y la segunda del último.

En la figura 18 se representa esquemáticamente la conexión entre diversos condensadores acoplados en serie.

Es evidente que las dos armaduras de dos condensadores sucesivos, unidas metálicamente, almacenarán cada una igual cantidad de electricidad; pero de signo contrario, según se desprende fácilmente de la electrización por inducción, estudiada en el

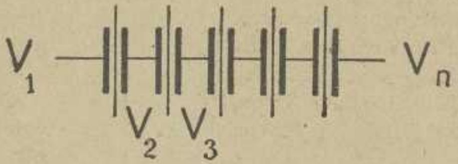


Fig. 18

capítulo IV (fig. 10), y lo mismo debe ocurrir respecto a las armaduras de un mismo condensador; así es que la carga de un condensador será igual a la del contiguo e igual en todos los elementos componentes de la batería.

Si la batería estuviera formada por un solo condensador de capacidad c, al aplicar en sus bornes una diferencia de tensión $V_1 - V_n$, almacenaría una carga, fórmula (1),

$$q = c\,(V_1 - V_n);$$

pero si la misma diferencia de tensión se aplica a los bornes de un montaje en serie formado por n condensadores iguales, es evidente que la tensión se repartirá entre todos los condensadores, quedando para cada uno sólo la enésima parte, como podría comprobarse midiendo las tensiones V_2, V_3, ... en las uniones de las armaduras intermedias. De este razonamiento se desprende que la cantidad de electricidad almacenada en cada condensador será n veces menor, y, por tanto, su expresión matemática debe ser

$$q = \frac{c}{n}(V_1 - V_n)$$

Al descargar la batería, uniendo metálicamente la primera armadura del primer condensador con la segunda del último, por el conductor de descarga pasará sólo la cantidad de electricidad almacenada en dichas armaduras, mientras las cargas acumuladas en las armaduras intermedias se neutralizarán en cada pareja, análogamente a lo que ocurría en el cilindro $A\,B$ de la figura 10 al descargar la esfera C; resulta, pues, que la cantidad de electricidad devuelta por la batería es la misma que se obtendría descargando un solo condensador, o sea,

$$q = \frac{c}{n}(V_1 - V_n)$$

Comparando este resultado con la fórmula (1) se observa que la capacidad de la batería está representada por la enésima parte de la capacidad de un condensador.

En resumen: el montaje en cantidad aumenta la capacidad, y el montaje en serie la disminuye.

En telegrafía sin hijos se hace frecuente uso de esta conclusión.

Ejemplos de cálculo

1.° *Capacidad de un kilómetro de cable sumergido en el agua, siendo el diámetro del alma un centímetro, y la capa aisladora, de gutapercha* ($k = 4$), *con un espesor de un centímetro.*

La superficie de la armadura interior será el área lateral de un cilindro que tiene 1 centímetro de diámetro y 100000 centímetros de longitud; luego

$$s = 2\,\pi\,1 \times 100.000 = 628.000 \text{ cm.}^2$$

y aplicando la fórmula general establecida anteriormente, tendremos

$$c = \frac{884}{10^{10}}\ \frac{628.000}{1} \times 4 = 0\text{'}2 \textit{ microf.}$$

2.° *Calcular la superficie que deben tener las armaduras de un condensador de 1 microfaradio para telegrafía, formado por hojas de estaño, separadas por papel parafinado* ($k = 2$), *cuyo grueso es de* 0,03 *centímetros*

De la fórmula establecida

$$c = \frac{884}{10^{10}}\ \frac{ks}{d} \textit{ microf.}$$

se deduce

$$s = \frac{10^{10} cd}{884k}$$

que con los valores particulares del ejemplo numérico que resolvemos, será

$$s = \frac{10^{10} \times 1 \times 0\text{'}03}{884 \times 2} = 179{,}650 \text{ cm.}^3$$

Si construímos el condensador de hojas de estaño apiladas, podremos tomar como superficie activa de las hojas sus dos caras.

Supongamos que las hojas van a ser circulares de 14 centímetros de diámetro, y cada una nos dará, con sus dos caras, una superficie de

$$\frac{2\,\pi\,14^2}{4} = 308 \text{ cm.}^2$$

luego el número de hojas por armadura será

$$\frac{169.650}{308} = 550$$

y para las dos armaduras 1100 hojas.

3.° *Calcular la capacidad de una línea de* 300 *kilómetros, formada por dos hilos de* 6 *milímetros de diámetro separados uno de otro* 70 *centímetros.*

Emplearemos la fórmula que hemos modificado, deducida de la de Pomey, y tendremos

$$c = 0{`}012 \frac{300}{\log. \frac{70}{0{`}3}} = 0{`}012 \frac{300}{1{`}3673} = 2{`}6 \ microf.$$

4.° *Calcular la capacidad de una línea de* 250 *kilómetros, formada por tres conductores de* 10 *milímetros de diámetro, separados unos de otros* 70 *centímetros.*

Empleando la fórmula correspondiente

$$c = 0{`}024 \frac{250}{\log. \frac{70}{0{`}5}} = 0{`}024 \frac{250}{2{`}1461} = 2{`}79 \ microf.$$

Condensador con anillo de guarda. La fórmula establecida para la capacidad de un condensador plano, y adoptada como suficientemente aproximada para los condensadores cilíndricos y esféricos, se deduce bajo la hipótesis de que el campo eléctrico existente entre sus armaduras es uniforme en toda la extensión comprendida por las mismas, lo cual no es absolutamente cierto.

Adoptamos para el condensador plano la forma del de Œpinus (fig. 12), es decir, constituído por dos platillos metálicos paralelos, con los bordes redondeados para evitar descargas lentas por sus aristas vivas y las dos superficies metálicas serán superficies equipotenciales del campo creado entre ellas. Como las líneas de fuerza son siempre normales a las superficies equipotenciales, al acercarnos a los bordes de los discos, las líneas de fuerza dejarán de ser paralelas a las situadas en el centro del platillo, y el campo, por tanto, pierde su condición de campo uniforme.

Para conseguir la uniformidad perfecta del campo en una extensión dada se forma uno de los platillos

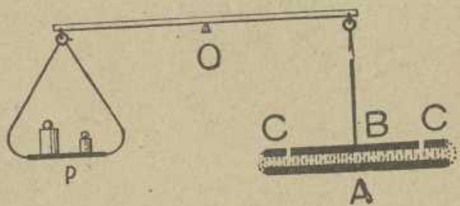


Fig. 19

metálicos de dos piezas independientes; un disco menor y una corona circular que le rodea, según se ve en sección en la figura 19. *B* es la sección del disco y *CC'* es la de la corona circular, que, teniendo en cuenta su objeto, se llama *anillo de guarda.*

El campo eléctrico comprendido entre *B* y *A* será perfectamente uniforme.

Electrómetro absoluto. En el condensador con anillo de guarda, representado en la figura anterior, la parte *B* de la armadura superior pende de un eje de balanza que se apoya en *O*, y que lleva en el otro extremo un platillo ordinario para colocar en él pesos *p*.

Creado el campo entre A y B las armaduras electrizadas con nombre contrario se atraen y su fuerza atractiva la equilibraremos con los pesos p. Tendremos así una relación entre los pesos y la diferencia de potencial V que exista entre A y B, es decir, tendremos manera de ***pesar los voltios***, conociéndolos sin necesidad de comparar su cantidad con ninguna otra cantidad análoga.

El aparato de la figura 19, que permite tal medida absoluta, se llama ***electrómetro absoluto.***

Es fácil ver la relación que liga a p con V.

La atracción entre las armaduras es un efecto de presión electrostática (capítulo IV), luego vale por unidad de superficie

$$\frac{H^2}{8\pi}$$

y para toda la superficie s de las armaduras

$$p = \frac{H^2}{8\pi} s = H^2 \frac{s}{8\pi}$$

Pero en un campo uniforme la intensidad es

$$H = \frac{V}{r}$$

y su cuadrado será

$$H^2 = \frac{V^2}{r^2}$$

luego, finalmente, se tendrá

$$p = \frac{V^2}{r^2} \; \frac{s}{8\pi}$$

de donde, despejando V, resulta

$$V = \sqrt{\frac{8\pi p r^2}{s}}$$

En esta fórmula, V y p son unidades cegesimales de potencial y fuerza. Para expresarlas en unidades prácticas hemos calculado el correspondiente coeficiente numérico y hemos hallado la fórmula de cómoda aplicación

$$V = 47.100\, r \sqrt{\frac{p}{s}}$$

en la cual V son voltios; r, centímetros; p, gramos, y s centímetros cuadrados.

EJEMPLO. *¿Qué diferencia de potencial debe existir entre las armaduras de un electrómetro absoluto para que se ejerza entre ellas una atracción de* 10 *gramos, siendo su superficie de un decímetro cuadrado y su separación un centímetro?*

Para la aplicación de la fórmula, tendremos

$$p = 10 \qquad r = 1 \qquad s = 100$$

y resultará

$$V = 47100 \times 1 \times \sqrt{\frac{10}{100}} = 15.700 \textit{ voltios}$$

Electrómetro de cuadrante. Otro aparato de electrometría, cuyo funcionamiento está basado en efectos de capacidad, es el electrómetro de cuadrante, representado esquemáticamente por la figura **20** en proyecciones horizontal y vertical. Un cilindro de latón, tapado por sus dos bases, está cortado por dos planos que pasan por el eje y son perpendiculares entre sí, dando lugar a los cuatro sectores que se ven en la figura en proyección horizontal B, C, D, E, y en sección B', D'.

Dentro del espacio limitado por los cuatro sectores se mueve otra pieza metálica A, A', llamada aguja, suspendida por un hilo de seda sin torsión, y pudiendo recibir comunicación eléctrica mediante su eje mismo, que se prolonga por debajo hasta sumergirse en un recipiente Q. Para observar el giro de la aguja lleva en su eje un espejo P.

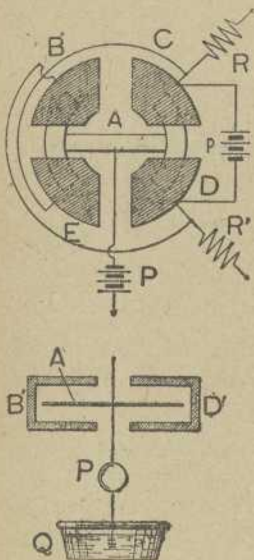


Fig. 20

Todas las piezas metálicas del aparato, sectores y aguja, tienen bastante superficie para presentar una capacidad eléctrica apreciable.

Los cuadrantes opuestos están en comunicación eléctrica mediante conductores que se ven en la figura.

La aguja A y cada uno de los pares de cuadrantes BD o CE forman un condensador, cuyo dieléctrico es el aire; y si electrizamos con un signo cualquiera la aguja, con igual signo un par de cuadrantes y con signo contrario el otro par, la aguja quedará sometida a una atracción y a una repulsión que sumarán sus efectos para obligarla a girar en un sentido determinado buscando una posición de equilibrio.

Llamando V, V_1 y V_2 a los potenciales de la aguja y de cada uno de los pares de cuadrantes, puede calcularse el ángulo Θ de giro del sistema móvil mediante la fórmula

$$\Theta = a\,(2V - V_1 - V_2)\,(V_2 - V_1)$$

en la cual *a* es una constante propia de cada aparato.

En el tomo correspondiente a mediciones eléctri-

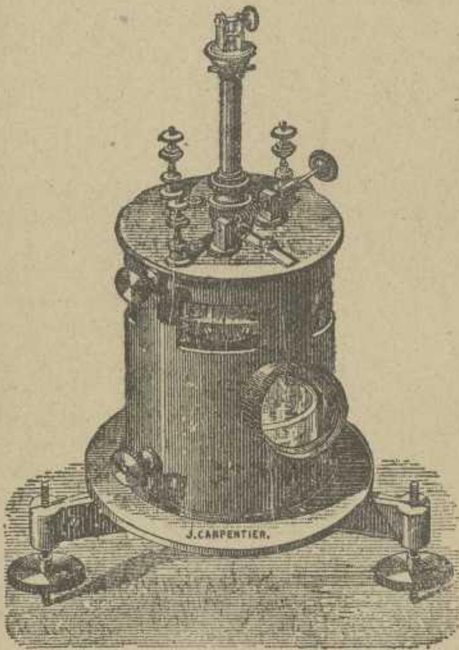


Fig. 21

cas de laboratorio haremos aplicaciones de esta fórmula.

En la figura 21 se ve el electrómetro de cuadrantes tipo Mascart, construído con arreglo a la teoría anterior por la citada casa J. Carpentier, de París

En el interior del cilindro que constituye el aparato se hallan los sectores metálicos, la aguja móvil y el depósito mediante el cual se da comunicación a la aguja.

Para observar los movimientos del espejito existe una ventana de mira que se ve en la parte anterior.

En el tomo XVIII estudiamos con más detalle el aparato.

CAPITULO VI

Electrodinámica

Corriente eléctrica. Si dos puntos A y B están a distinto potencial V_1, V_2, y los ponemos en comunicación eléctrica mediante un conductor, la diferencia de potencial o trabajo realizable tiende a convertirse en trabajo realizado y se produce un transporte de masa eléctrica a lo largo del conductor, que cesa en cuanto se han igualado los potenciales.

Si por un procedimiento cualquiera conseguimos mantener constante la diferencia de potencial entre los puntos A y B, el transporte subsistirá durante un tiempo más o menos largo, constituyendo una *corriente eléctrica.*

Diferencia de potencial y fuerza electromotriz. El medio de que nos valgamos para mantener constante la diferencia de potencial, o la causa que determine esta constancia, es lo que se llama fuerza electromotriz. Actualmente los procedimientos empleados para producir esta fuerza electromotriz son solamente químicos y mecánicos.

Como se ve, *la fuerza electromotriz es la causa y la diferencia de potencial es el efecto*. Parte de la fuerza electromotriz se consume dentro de los generadores eléctricos, cualquiera que sea su fundamento y funcionamiento; de manera que *la diferencia de potencial es siempre menor que la fuerza electromotriz*. La diferencia entre ambas magnitudes se llama *caída interior de potencial o de tensión.*

La fuerza electromotriz, la diferencia de potencial y la caída interior de tensión, se miden con una misma unidad, que es el *voltio.*

Así, por ejemplo, en una dínamo de corriente continua, diremos que si tiene una fuerza electromotriz de 500 voltios y una diferencia de potencial de 480 voltios, tiene una caída interior de tensión de 20 voltios.

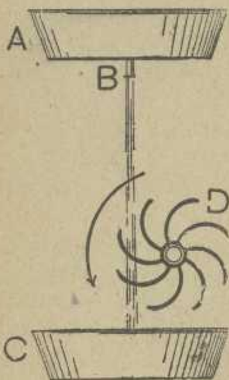


Fig. 22

Leyes de la corriente eléctrica. Para darnos cuenta exacta de algunas leyes fundamentales de la corriente eléctrica recurriremos a un símil hidráulico sencillo.

Consideremos en *A* (figura 22) un depósito lleno de agua, con un agujero en el fondo *B*, por el cual sale una corriente de agua que asemejaremos a una corriente eléctrica. Supondremos que el nivel en *A*, o, mejor dicho, la *diferencia de nivel o potencial* entre *A* y *C*, permanece constante a pesar de la salida del líquido, lo cual obliga a suponer que hay una disposición especial, una bomba, por ejemplo, que devuelve constantemente el agua de *C* a *A*. La función de la bomba es exactamente la representante de la *fuerza electromotriz.*

Para apreciar el gasto de agua que supone la salida de la vena líquida, lo más sencillo sería recoger el agua durante un segundo y expresar el gasto en litros. Cuando se trata de corriente eléctrica, el gasto de flúido se llama también *gasto* o *intensidad de corriente*, o simplemente *corriente*; se aprecia por la cantidad de masa eléctrica transportada durante un segundo y se expresa en *amperios*.

Diremos, pues, que el amperio, o sea la unidad de intensidad, es la cantidad de electricidad que pasa por un hilo durante un segundo.

Ley de Faraday. Si la intensidad de la corriente es constante durante t segundos, es evidente que la cantidad total q de electricidad transportada durante aquel tiempo será, expresada en amperios, I

$$q = It$$

Esta relación es conocida con el nombre de *ley de Faraday.*

La unidad para medir cantidades de electricidad es el *culombio*; de manera que podremos decir que el *culombio es el producto del amperio por el segundo.*

En electrostática hemos definido ya el *culombio* como *producto del faradio por el voltio,*

$$q = cv$$

Igualando ambos valores de q tendremos

$$It = cv$$

de donde se deduce

$$v = \frac{It}{c}$$

que nos da la tensión necesaria para cargar una capacidad.

Conductores. Los cuerpos que dejan pasar una corriente eléctrica se llaman conductores. En las aplicaciones industriales de la electricidad se emplean casi exclusivamente los conductores metálicos de composición variable, según el objeto a que se destinan. Cuando se trata de facilitar el paso de la corriente eléctrica se emplean los conductores de hierro, cobre, bronce y aluminio. Cuando se trata, por el contrario, de oponer alguna dificultad al paso de la corriente eléctrica, para limitar su intensidad, se emplean conductores de maillechor, platino y algunas otras aleaciones metálicas, especialmente destinadas a este objeto. Sólo cuando se trata de obtener grandes resistencias se emplean conductores no metálicos, entre ellos el carbón y los líquidos.

Resistencias (*). *Resistencia de un conductor es la mayor o menor dificultad que el conductor opone al paso de la corriente eléctrica.* No existe ningún conductor perfecto, es decir, ningún conductor por el cual pueda circular la corriente eléctrica sin dificultad alguna.

Resistividad o resistencia específica de una substancia cualquiera es la resistencia que opone al paso de la corriente un cubo construído de esta substancia y teniendo por arista la unidad lineal. En el actual sistema de unidades se toma como unidad lineal el centímetro y como unidad de resistencia el *ohmio.*

Los metales buenos conductores tienen su resistividad muy pequeña, y para evitar el empleo de fracciones con muchas cifras decimales se refiere la

---

(*) El tomo X de esta Biblioteca está especialmente dedicado al estudio de la resistencia. Sin embargo, necesitamos establecer aquí fórmulas fundamentales para teorías sucesivas, y, sobre todo, para el estudio de las unidades eléctricas que lo hacemos en el tomo II.

resistividad al *micro-ohmio-centímetro*, o sea a la millonésima de ohmio por centímetro cúbico.

En cambio, los cuerpos malos conductores o aisladores tienen una resistividad muy grande, y se toma como unidad el *meghomio*, o sea el millón deohmios.

La resistividad de una substancia se representa por la letra griega ρ.

Siendo la resistencia una dificultad que el conductor opone a la corriente, es evidente que será tanto mayor cuanto mayor sea la longitud l del conductor, y tanto menor cuanto mayor sea la sección s. Podremos, por tanto, representar la resistencia de un conductor por la fórmula

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

Midiendo l en metros y s en milímetros cuadrados el coeficiente ρ toma los valores siguientes:

Plata............	0'015	Antimonio.......	0'354
Cobre............	0'016	Hierro...........	0'097
Oro..............	0'020	Níquel...........	0,119
Aluminio........	0'030	Estaño..........	0'132
Cinc.............	0'056	Plomo...........	0'191
Platino..........	0'090	Mercurio.........	0'940
Mélchior.........	0'209	Bismuto.........	1'310

EJEMPLO. *Calcular la resistencia de un hilo de platino de 7 metros de longitud y 0,5 milímetros de diámetro.*

Para aplicar la fórmula, tendremos

$$l = 7 \qquad s = \frac{\pi \times 0\ 5^2}{4} = 1'96$$

y, por tanto,

$$R = 0'09 \frac{7}{1'96} = 0'32 \textit{ ohmios}$$

Conductancia y conductividad. Conductancia de un conductor y conductividad de una substancia son las inversas de la resistencia y de la resistividad. Representándolas, respectivamente, por K y γ, podremos escribir

$$K = \frac{1}{R} \quad \text{y} \quad \gamma = \frac{1}{\rho}$$

Es claro que las variaciones de la conductancia con las dimensiones del conductor deben ser inversas que las de la resistencia, es decir, la conductancia debe mejorar con la sección y disminuir cuando la longitud crece. Tendremos, por tanto,

$$K = \gamma \frac{s}{l}$$

La unidad para medir la conductancia y conductividad de los conductores se llama *mhoio* (*).

En el símil hidráulico de que nos hemos valido al empezar este capítulo, la conductancia estará representada por la sección del agujero B (fig. 22) y la resistencia será la inversa de esta sección.

El conductor de platino, estudiado en el ejemplo último, si tiene una resistencia de 0,32 ohmios tendrá una conductancia de

$$K = \frac{1}{0'32} = 3'12 \textit{ hmoios}$$

y, del mismo modo, si la resistividad del platino es 0,09 por metro de longitud y milímetro cuadrado de sección, su conductividad será

$$\gamma = \frac{1}{0'09} = 11 \textit{ mhoios}$$

(*) Dedicada a Ohm la unidad de resistencia, se ha hablado en los últimos Congresos de electricistas de invertir las letras para formar el nombre de la unidad de conductividad, y los franceses han admitido la palabra *mho*. Para españolizar la palabra y darle terminación análoga a la de otras unidades, nos permitimos escribir *mhoio*, esperando que la Academia nos diga lo que debe ser.

por milímetro cuadrado de sección y metro de longitud.

Agrupación de conductores. Si unimos varios conductores de manera que el fin de cada uno se empalme con el principio del siguiente, quedando libres el principio del primero y el fin del último, diremos que los conductores están *acoplados en serie o tensión.*

Si unimos varios conductores de manera que los principios de todos ellos se reunan en un punto y los fines en otro punto, diremos que los conductores están acoplados *en paralela o cantidad.*

En nuestro símil hidráulico representaríamos el agrupamiento de varios conductores en serie, suponiendo, como en la figura 22, que el agua cae de un depósito *A* a un epósito *C*; pero agujereando también este depósito, para que el agua salga de él cayendo a un tercer depósito *D*, no dibujado, agujereando igualmente este depósito para que se establezca corriente a un cuarto depósito, y así sucesivamente.

Cada conductor quedará representado por el chorro que cae de un depósito al siguiente.

Podemos sentar dos principios importantes de esta clase de agrupación de conductores.

1.° Si montamos en serie varios conductores *la diferencia de potencial exigida por la serie será la suma de las diferencias de potencial exigidas por cada uno de los conductores.* Esto justifica el nombre de acoplamiento en tensión.

2.° Si montamos en serie varios conductores, *la corriente exigida por la serie es la misma exigida por un solo conductor*, o, dicho de otro modo, *la corriente es la misma en cualquier punto del circuito.*

Así, por ejemplo, si un arco voltaico exige 50 vol.

tios y consume 15 amperios, montando 4 arcos iguales *en serie*, necesitaremos 50 × 4 = 200 voltios, y consumiremos 15 amperios.

En nuestro símil hidráulico representaríamos el agrupamiento de varios conductores en paralelo, suponiendo que en el depósito A existen varios agujeros B, B', B'',... y que por todos ellos cae el agua al depósito C. Cada conductor quedará representado por uno de los chorros que caen del primer depósito al segundo.

Podemos sentar dos principios análogos a los del caso anterior.

1.° Si montamos en paralela varios conductores, *la corriente exigida por el conjunto será la suma de las corrientes exigidas por cada uno de ellos*. Esto justifica el nombre de acoplamiento en cantidad.

2.° Si montamos en paralela varios conductores, *la tensión exigida por el conjunto será la misma exigida por uno solo*.

Así, por ejemplo, si un arco voltaico exige 50 voltios y consume 15 amperios, montando 4 arcos *en paralela* consumiremos 15 × 4 = 60 amperios, y necesitaremos 50 voltios.

Resistencias en serie. La fórmula conocida

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

nos dice que la resistencia de un conductor depende directamente de su longitud; por tanto, si se unen varios conductores en serie, sumando sus longitudes para formar la longitud total del circuito, *la resistencia obtenida será la suma de las resistencias componentes*, y se podrá expresar por

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots \qquad (1)$$

Poniendo en lugar de las resistencias las inversas (*) de las conductancias, tendremos

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots$$

de donde se deduce

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots} \qquad (2)$$

esta fórmula nos dice que *la conductancia de varios conductores en serie, es la inversa de la suma de las inversas de las conductancias componentes.*

En el caso particular de ser solamente dos los circuitos conexionados, la conductancia compuesta sería

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$$

de donde resulta

$$K = \frac{1}{\frac{k_2 + k_1}{k_1 \quad k_2}} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

es decir, igual al producto partido por la suma de las conductancias componentes.

Si todos los circuitos fuesen eléctricamente iguales y su número fuese n, tendríamos, en la fórmula (1),

$$R = nr$$

y en la fórmula (2),

$$K = \frac{1}{n\frac{1}{k}} = \frac{k}{n}$$

(*) Llamamos inversa de una cantidad a al cociente $\frac{1}{a}$ que se obtiene dividiendo la unidad por aquella cantidad.

luego *la conexión en serie, multiplica la resistencia y divide la conductancia.*

Resistencias en paralela. La fórmula

$$K = \gamma \frac{s}{l}$$

hacer ver que la conductancia depende directamente de la sección, de aquí se deduce que al unir en paralela varios conductores, sumando sus secciones para formar la sección total del circuito, *la conductancia obtenida será la suma de las conductancias componentes,* y se podrá expresar por

$$K = k_1 + k_2 + k_3 + \dots \qquad (3)$$

Poniendo en lugar de las conductancias las inversas de las resistencias, tendremos

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots$$

de donde se deduce

$$R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots} \qquad (4)$$

fórmula que nos dice: *la resistencia de varios conductores en paralela es la inversa de la suma de las inversas de las resistencias componentes.*

En el caso particular de ser solamente dos los circuitos conexionados, la resistencia compuesta sería

$$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

es decir, igual al producto partido por la suma de las resistencias componentes.

Si todos los conductores fuesen eléctricamente iguales, y su número fuese n, las fórmulas (3) y (4) se convertirían en

$$K = nk \qquad R = \frac{r}{n}$$

luego *la conexión en paralela multiplica la conductancia y divide la resistencia*; es decir, lo contrario del resultado obtenido en la conexión en serie.

Agrupación mixta. Varios conductores se dice que están montados en acoplamiento mixto cuando se forman con ellos varias series $aa'a'' \ldots bb'b'' \ldots$ (fig. 23), para poder reunir luego todas las series en

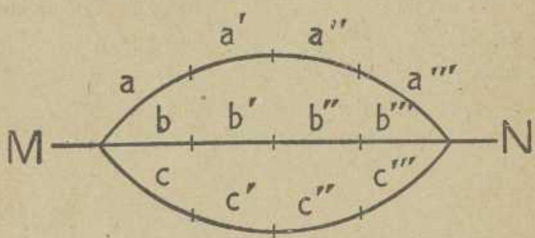


Fig. 23

cantidad entre dos puntos MN; o también, cuando se forman varios grupos $aa'a'' \ldots bb'b'' \ldots$ (fig. 24), para reunir luego en serie todos los grupos.

Para hallar la resistencia total en cualquiera de los dos casos dibujados, bastará hallar las resistencias compuestas de $aa'a'' \ldots bb'b'' \ldots$, etc., y luego tratar estos resultados como si fueran conductores simples, para calcular la derivación de la figura 23 o la serie de la figura 24.

EJEMPLO. *Se dispone de* 12 *lámparas de incandescencia, cada una de las cuales tiene* 100 *ohmios de*

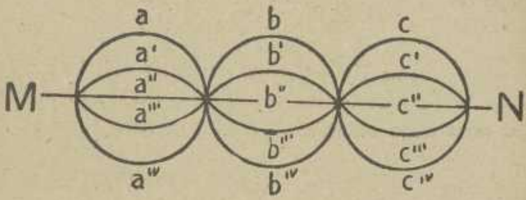


Fig. 24

resistencia, y se desea conocer la resistencia de todas ellas cuando estén acopladas:

1.°, *en serie;*
2.°, *en paralela;*
3.°, *en mixto como el de la figura* 23;
4.°, *en mixto como el de la figura* 24.

1.° Si están todas en serie, tendremos

$$R_1 = 12 \times 100 = 1.200 \textit{ ohmios}$$

2.° Estando todas en paralela, darán

$$R_2 = \frac{100}{12} = 8‘33 \textit{ ohmios}$$

3.° Con el acoplamiento de la figura 23 cada serie de cuatro lámparas tendrá una resistencia de

$$4 + 100 = 400$$

y las tres series reunidas en cantidad,

$$R_3 = \frac{400}{3}\ 133{'}33\ \textit{ohmios}$$

4.° Con el acoplamiento de la figura 24 cada grupo de cuatro lámparas tendrá una resistencia de

$$\frac{100}{4} = 25$$

y la serie formada por los tres grupos,

$$R_4\ 3 \times 25 = 75\ \textit{ohmios}$$

Ley de Ohm. La intensidad I de la corriente eléctrica que circula entre dos puntos debe ser tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia de potencial o fuerza electromotriz que la produce, y tanto menor cuanto mayor sea la resistencia del conductor por donde circula, de manera que llamando V a los voltios de diferencia de potencial y R a los ohmios de resistencia, puede escribirse

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

Esta relación, entre la corriente, tensión y resistencia de un circuito, es conocida con el nombre de *ley* o *fórmula de Ohm*; la cual, recordando las unidades respectivas, puede reducirse así:

$$\textit{amperio} = \frac{\textit{voltio}}{\textit{ohmio}}$$

Esta fórmula nos permite dar una definición del amperio como unidad de intensidad. Diremos que *el amperio es la intensidad que produce un voltio a través de un ohmio.*

La misma fórmula de Ohm, escrita así:

$$V = RI$$

nos dice que los voltios consumidos en un conductor vienen expresados por el producto de su resistencia por la intensidad que circula.

Así, por ejemplo, si en el circuito de un arco voltaico que consume 25 amperios intercalamos una resistencia de 0,2 ohmios, reduciremos la tensión que llega al arco en

$$V = 0'2 \times 25 = 5 \textit{ voltios}$$

La inserción de resistencias en los circuitos eléctricos es procedimiento aceptado para consumir voltios, siempre que la corriente que circula tenga la forma continua que ahora estudiamos.

Cálculo de la corriente en un conductor o en un circuito completo. Para las aplicaciones de la fórmula de Ohm hay que distinguir los casos en que se trata de calcular la corriente que circulará por un conductor, un trozo de línea, por ejemplo, y el caso en que se trate de un circuito completo.

En el primer caso basta medir la diferencia de tensión $V_1 - V_2$ entre los extremos del conductor, y calcular por la fórmula

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

En un circuito cerrado completo, es decir, formado por un generador de corriente, una línea de transmisión y un receptor cualquiera, deben considerarse dos resistencias: la *interior* del generador, y la *exterior* de línea y receptor; y ambas deben sumarse para formar el denominador de la fórmula de Ohm. Pero en este caso el numerador es la fuerza electromotriz nacida en el generador, y tendremos

$$I = \frac{E}{R + r}$$

de donde, quitando el denominador, resulta

$$E = RI + rI$$

Como se ve, la fuerza electromotriz E, nacida en el seno de un generador cualquiera, se descompone en dos sumandos: el uno, RI, es la diferencia de potencial utilizable en el circuito exterior, y el otro, rI, es la caída interior o voltios perdidos dentro mismo del generador. Esto está conforme con lo dicho al empezar este capítulo respecto a fuerza electromotriz y diferencia de potencial.

Descarga lenta de un condensador. Un condensador cargado de manera que entre sus armaduras exista una diferencia de potencial V_2, tiende a descargarse lentamente por sí solo, aun cuando las armaduras permanezcan separadas por el dieléctrico, y al cabo de algún tiempo, más o menos largo, se encuentra el condensador absolutamente descargado. Este efecto puede atribuirse a la existencia de una corriente establecida a través del dieléctrico como resistencia, y debida a la diferencia de potencial que existe entre las armaduras.

Desde que la carga del condensador es V_2, hasta que la carga desciende a V_1, transcurre un tiempo que debe ser directamente proporcional a la resistencia R del dieléctrico y a la capacidad c del condensador, y que, además, debe depender de la relación entre las tensiones inicial V_2 y final V_1.

Este tiempo se calcula en segundos mediante la fórmula

$$T = \frac{Rc}{0'4343} \times log. \frac{V_2}{V_1}$$

en la cual R son ohmios; c, faradios; V_2 y V_1, voltios, y *log.* es la indicación de logaritmo vulgar.

EJEMPLO. *Un cable submarino tiene una capacidad de* 0,2 *microfaradios, y su cubierta aisladora presenta una resistencia entre el alma y las aguas de* 2 *megohmios. Calcular el tiempo necesario para que la tensión del cable se reduzca a la décima parte.*

Para aplicar la fórmula anterior se tiene

$$R = 2.000.000 \qquad c = 0'0000002 \qquad V_1 = 0'1\, V_2$$

y, por tanto,

$$T = \frac{2.000.000 \times 0'0000002}{0'4343} \times log.\ 10 = 0'92$$

Ley de Joule. Volvamos a nuestro símil hidráulico y tratemos de determinar el trabajo desarrollado por la corriente de agua que cae del depósito A al C (fig. 22).

Para aprovechar este trabajo, intercalemos en el camino seguido por la vena líquida una rueda de paletas D, que al recibir el choque del agua girará en el sentido indicado por la flecha y desarrollará un trabajo mecánico expresado, según sabemos (capítulo II) por el producto de una fuerza por un camino. La fuerza está aquí representada por el peso del agua o cantidad q de agua caída; y el camino es la diferencia de nivel V entre el depósito A y la rueda D. Tendremos, pues, como expresión del trabajo

$$J = qV$$

Análogamente, en el caso de una corriente eléctrica, *el trabajo vendrá expresado como producto de la cantidad de electricidad por la tensión.*

Expresando la cantidad q en función de la intensidad I y del tiempo t, podremos también escribir

$$J = ItV$$

ya que, según la ley de Faraday,

$$q = It$$

Recordemos que *potencia es el trabajo realizado en la unidad de tiempo*; luego llamando W a esta potencia y haciendo $t = 1$, tendremos, de la fórmula del trabajo,

$$W = IV$$

de manera que *potencia de una corriente eléctrica es el producto de su intensidad por su tensión.*

Es claro que el trabajo podrá expresarse también en función de la potencia mediante la fórmula

$$J = Wt$$

Unidades de potencia y trabajo. La unidad de potencia es el *vatio*, y su definición se deduce de la igualdad

$$W = IV$$

Diremos, pues, que *el vatio es la potencia desarrollada por una corriente de un amperio bajo la tensión de un voltio.*

Se calcularán los vatios de una corriente multiplicando sus amperios por sus voltios.

Así, por ejemplo, un arco voltaico que funciona a 50 voltios y consume 20 amperios, diremos que exige $50 \times 20 = 1000$ vatios. Un motor que funciona a 220 voltios y consume 4 amperios, tiene una potencia de $220 \times 4 = 880$ vatios.

Para las máquinas empleadas hoy en las explotaciones industriales resulta el vatio muy pequeño y, por tanto, las potencias expresadas por números muy grandes. Para evitar este inconveniente se cuenta por múltiplos del vatio, formados con arreglo a la misma ley del sistema métrico decimal, como son el hecto-vatio y el kilo-vatio. Así se dice, por ejemplo, una dínamo de cinco kilovatios, un transformador de dos kilovatios y medio, etc., etc.

En las aplicaciones mecánicas de la electricidad se emplea también el caballo de vapor como unidad de potencia. El caballo de vapor equivale a 736 vatios.

Cuando estudiemos detalladamente el sistema de unidades eléctricas justificaremos esta equivalencia (tomo II).

La unidad de trabajo es el *julio*, y se determinan los julios producidos por una corriente *multiplicando los vatios por los segundos*, según hace ver la fórmula

$$J = Wt$$

Así, por ejemplo, un arco voltaico que funciona a 50 voltios y 20 amperios, consume $50 \times 20 = 1000$ vatios, y si se mantiene encendido durante 357 segundos exigirá un trabajo de $1000 \times 357 = 357000$ julios.

Siendo los julios el producto de vatios por segundos, resultan siempre los trabajos expresados en números muy grandes, y para evitarlo se cambia la unidad de tiempo y se cuenta por *vatio-horas*, en lugar de vatio-segundos, que son los julios.

Es claro que el vatio-hora valdrá

$$60 \times 60 = 3.600 \textit{ julios}$$

Todavía parece pequeña esta unidad de trabajo y se emplean sus múltiples decimales *hecto-vatio-hora* (*h-w-h*) y *kilo-vatio-hora* (*k-w-h*), que valen, respectivamente,

$$1\ h\text{-}v\text{-}h = 360.000 \textit{ julios}$$
$$1\ k\text{-}v\text{-}h = 3.600.000 \textit{ julios}$$

EJEMPLO. *Un arco de cinematógrafo funciona a 220 voltios y consume 30 amperios. Calcular lo que cuesta una sesión de proyecciones que dura dos horas, pagándose el flúido a 35 céntimos el kilovatio-hora.*

Con 220 voltios, 30 amperios y dos horas de funcionamiento, se tienen

$$220 \times 30 \times 2 = 13.200 \textit{ vatios-hora}$$

o sea

$$13'2 \textit{ kilovatios-hora;}$$

luego el importe de la sesión será

$$13'2 \times 35 = 462 \textit{ céntimos}$$

Efecto Joule. Si una corriente eléctrica circula por un conductor sin efectuar un trabajo, toda la energía de la corriente degenera en calor, elevando la temperatura del conductor recorrido. A este calentamiento se le llama efecto Joule.

La potencia transformada en calor, correspondiente a una corriente de V voltios e I amperios, será

$$W = VI \quad \text{o} \quad W = EI \text{ (*)}$$

Pero, según la ley de Ohm, podemos substituir V por RI, y tendremos

$$W = RI^2$$

o también podemos substituir I por $\frac{V}{R}$, y quedará

$$W = R\frac{V^2}{R^2} = \frac{V^2}{R} \quad \text{o} \quad W = \frac{E^2}{R}$$

En cualquiera de estas formas se expresa la potencia perdida por efecto Joule, y que traducidas al lenguaje vulgar dicen:

Los vatios perdidos en un circuito de resistencia R *equivalen al producto de esta resistencia por el cuadrado de la corriente* I *que atraviesa el circuito, y* también;

El efecto Joule correspondiente a una tensión V *es igual al cuadrado de esta tensión partido por la resistencia* R *del circuito donde está aplicada.*

El trabajo perdido durante un tiempo t será

$$J = VIt \quad J = RI^2t \quad J = \frac{V^2}{R}t$$

(*) Los voltios los representamos indistintamente por V o por E, según se refieren a una diferencia de tensión o a una fuerza electromotriz.

EJEMPLO. *El arco de cinematógrafo, considerado en el último ejemplo, exige para su buen funcionamiento una resistencia de 5,3 ohmios intercalada en su circuito. Calcular la energía perdida durante cada sesión de dos horas.*

Para aplicar la segunda de las fórmulas halladas del efecto Joule, tenemos

$$R = 5{\cdot}3 \quad I = 30 \quad t = 2$$

y, por tanto,

$$J = 5{\cdot}3 \times 30^2 \times 2 = 9.540 \; w\text{-}h$$

Leyes de Kirchoff. Otras leyes de frecuente empleo en la teoría y aplicaciones de la electricidad son las dos de Kirchoff, cuyos enunciados son los siguientes:

1.° *Cuando varios conductores se reúnen en un punto o nudo, la suma de las corrientes que llegan al nudo es igual a la suma de las corrientes que salen de él.* Esto es una consecuencia del principio de conservación de la energía, y es evidente que si en el nudo no hay ni producción ni absorción de corriente, todas las que lleguen deben salir, y nada más que las que lleguen.

2.° *En un polígono cerrado, formado por conductores, la suma algebraica de las fuerzas electromotrices es igual a la suma algebraica de productos de intensidades por resistencias.*

En la ley de Ohm, estudiada anteriormente, hemos hallado la expresión

$$V = RI \quad \text{o} \quad E = RI + rI$$

y la ley de Kirchoff, que ahora estudiamos, es solamente una generalización de aquélla y se expresa por la fórmula (*)

$$\Sigma E = \Sigma RI$$

Al decir suma algebraica es preciso poder determinar el signo de los sumandos, y para ello se adoptan los dos convenios siguientes:

En un polígono cerrado por conductores, las intensidades en sus lados son positivas cuando marchan en el sentido de las agujas de un reloj, y son negativas cuando marchan en sentido contrario.

En el mismo polígono, si sus lados contienen generadores que produzcan fuerzas electromotrices, éstas serán positivas cuando produzcan intensidades positivas, y serán negativas en caso contrario.

Como aplicación de las leyes de Ohm y de Kirchoff, resolvamos las cuestiones siguientes.

Distribución de la tensión entre conductores unidos en serie. Sean *AB*, *BC*, *CD*, ... varios conducto-

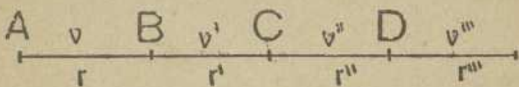


Fig. 25

res unidos en serie (fig. 25), cuyas resistencias respectivas son r, r', r'', ... y cuya resistencia total es

$$R = r + r' + r'' + \ldots$$

(*) La letra griega Σ (sigma mayúscula) se emplea para indicar una suma cuyos sumandos tengan todos una forma parecida. Así, la segunda ley de Kirchoff la expresaríamos de este modo:

$$E + E' + E'' + \ldots = RI + R'I' + R''I'' + \ldots$$

pero es más breve y elegante la expresión

$$\Sigma E = \Sigma RI$$

Se somete el conjunto a una tensión total V, y se trata de calcular las tensiones v, v', v'', ... consumidas por cada uno de los conductores.

Si los V voltios han de ser absorbidos por los R ohmios, es evidente que a un ohmio le corresponderán

$$\frac{V}{R} \textit{ voltios}$$

por tanto, a r ohmios,

$$v = \frac{V}{R} r$$

y, del mismo modo,

$$v' \frac{V}{R} r' \qquad v'' = \frac{V}{R} r'' \ldots$$

Se recordará fácilmente este método de cálculo, observando que varios conductores unidos en serie forman *una compañía* para repartirse la ganancia total de V voltios, proporcionalmente a sus capitales en ohmios. El cálculo es exactamente el de una regla de compañía simple.

EJEMPLO. *En una canalización a* 220 *voltios se dispone un grupo de* 10 *bombillas* A, *montadas en paralela, unido en serie con otro grupo de* 4 *bombillas* B, *unidas también entre sí en paralela* (fig. 26). *Las bombillas exigen para su funcionamiento normal* 110 *voltios cada una, ¿qué sucederá con la conexión indicada en la figura?*

(Esta conexión puede presentarse en una distribución trifilar que tenga los puentes mal equilibrados, cuando en un momento dado falte el neutro por el empleo indebido de fusibles en este hilo.)

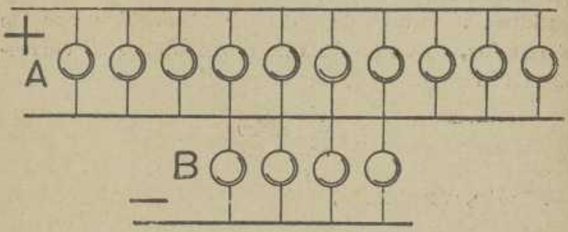


Fig. 26

Si es b la resistencia de una bombilla, la del grupo A será

$$r = b : 10 = 0'1b$$

la del grupo B,

$$r' = b : 4 = 0'25b$$

y la resistencia del conjunto,

$$R = 0'1b + 0'25b = 0'35b$$

Aplicando las fórmulas halladas para distribución de tensiones, tendremos para el grupo A

$$v' = \frac{220}{0'35b} \times 0'1b = 62'85 \textit{ voltios}$$

y para el grupo B,

$$v' = \frac{220}{0'35b} \times 0'25b = 156'15 \textit{ voltios}$$

Lo que sucederá con esta distribución de tensión es que las bombillas del grupo B se quemarán por un exceso de voltaje.

Distribución de corriente entre conductores unidos en paralela. Sean 1, 2, 3, ... varios conductores unidos en paralela (fig. 27), cuyas conductancias son k, k', k'',... y cuya conductancia total es

$$K = k + k' + k'' + ...$$

Al extremo A del grupo llega una intensidad to-

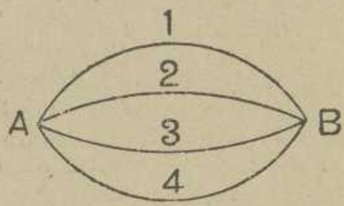


Fig. 27

tal I, y se trata de calcular las corrientes i, i', i'',... que circularán por cada uno de los conductores.

Si los I amperios han de circular por los K mhoios, a cada mhoio corresponderán

$$\frac{I}{K} \textit{ amperios}$$

por tanto, a k mhoios

$$i = \frac{I}{K} k$$

y, del mismo modo,

$$i' = \frac{I}{K} k' \qquad i'' = \frac{I}{K} k'' \; ...$$

Se recordará fácilmente este método de cálculo, observando que varios conductores unidos en paralela forman *una compañía* para repartirse la ganancia total de I amperios, proporcionalmente a sus capitales en mhoios. El cálculo es exactamente el de una regla de compañía simple.

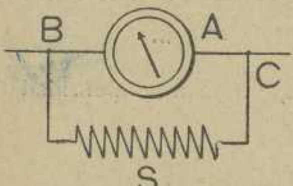


Fig. 28

EJEMPLO. *Un aparato* A (fig. 28), *de conductancia* 0,5 *mhoios, está unido en paralela con una resistencia* S, *en derivación* (shunt) *de* 2 *mhoios. Por el conjunto han de circular* 30 *amperios, y se desea saber qué fracción de corriente circulará por cada uno de los caminos.*

La conductancia total será

$$K = 0'5 + 2 = 2'5$$

Aplicando las fórmulas halladas para distribución de corrientes, tendremos para el aparato A

$$i = \frac{30}{2'5} \times 0'5 = 6 \textit{ amperios}$$

y para la resistencia S,

$$i' = \frac{30}{2'5} \times 2 = 24 \textit{ amperios}$$

Como comprobación de estos resultados vamos a hacer aplicaciones de las leyes de Kirchoff. La primera ley, aplicada al nudo B, nos dice que la corriente que llega (30 amperios) debe ser igual a la suma de las corrientes que salen por A y por S; en efecto, resulta

$$6 + 24 = 30 \textit{ amperios}$$

Para aplicar la segunda ley al polígono $BACS$, hemos de tener en cuenta que en él, no existiendo ningún generador, la ΣE es nula, y, por tanto, debe ocurrir que

$$\Sigma RI = 0$$

Las resistencias de A y de S, según los datos, valen

$$r_2 = \frac{1}{0'5} = 2 \textit{ ohmios}, \qquad r_2 = \frac{1}{2} = 0'5 \textit{ ohmios}$$

Teniendo en cuenta que la corriente entra por B, es fácil observar que la corriente de A marcha en el mismo sentido de las agujas del reloj, y al contrario la corriente de S; luego debe ser positiva la primera y negativa la otra, resultando

$$\Sigma RI = 2 \times 6 - 0'5 \times 24 = 0$$

Puente o paralelogramo de Wheatstone. Otra aplicación importante de las leyes de Kirchoff es la teoría del puente de Wheatstone.

Se da este nombre al conjunto de cuatro resistencias variables, a, b, c, l (fig. 29), conexionadas de manera que cierren un cuadrilátero, 1, 2, 3, 4, reuniendo dos vértices opuestos 1 y 4, mediante un generador de corrientes p, y los otros dos, 2 y 3, mediante un receptor r, que tiene por objeto indicar el paso de corriente entre 2 y 3.

La corriente procedente de p entra por el vértice 1 y regresa al generador por el vértice 4, marchando por las resistencias en el sentido marcado por las flechas de la figura.

No estando el circuito interrumpido, siempre habrá corriente por los lados del cuadrilátero; pero la diagonal que contiene el receptor r puede quedar sin corriente en cuanto las tensiones V_2 y V_3 de los vértices 2 y 3 sean iguales, según demuestra la ley de Ohm

$$i = \frac{V_2 - V_3}{r} = \frac{0}{r} = 0$$

En tal caso la corriente del generador al llegar

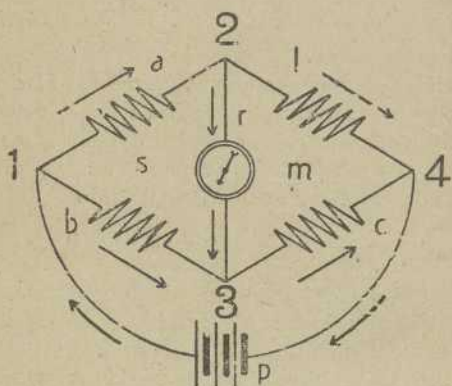


Fig. 29

en el vértice 1 se descompone en dos: la I', que pasa por a y l, y la I'', que marcha por b y c.

Para que las tensiones V_2 y V_3 sean iguales es preciso que la pérdida de voltios en a sea igual que en b y la de c que en l, cosa fácil de conseguir pudiendo variar las cuatro resistencias, y conseguido lo cual podemos escribir las siguientes igualdades, deducidas de la ley de Ohm:

$$aI' = bI''$$
$$lI' = cI''$$

que, divididas miembro a miembro y simplificadas, dan la siguiente proporción:

$$\frac{a}{l} = \frac{b}{c}$$

de donde resulta

$$ac = lb$$

lo cual nos dice que *la diagonal del puente, que contiene el receptor, puede quedarse sin corriente, y se quedará cuando entre las resistencias que forman los lados exista la proporcionalidad anterior* o, dicho de otro modo, *cuando el producto de dos brazos opuestos del cuadrilátero sea igual al producto de los otros dos.*

En este caso se dice que *el puente está equilibrado.*

En electrometría y en telegrafía múltiple, se hace frecuente aplicación de esta propiedad del puente de Wheatstone, que estudiamos en tomos sucesivos.

CAPITULO VII

Electromagnetismo

Fenómeno de Oersted. Suspendamos una aguja imantada por su centro de gravedad y dejémosla que oscile cuanto quiera y se oriente en una dirección determinada, que será la dirección norte-sur

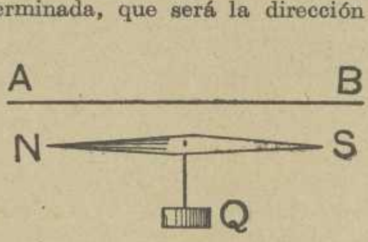


Fig. 30

del campo magnético terrestre. Tal aguja constituye exactamente una brújula.

Situemos un hilo de cobre AB (fig. 30) próximo y paralelo a la aguja NS. Al lanzar una corriente eléctrica por el conductor AB la aguja se mueve, dejando su orientación y tendiendo a ponerse perpendicular al conductor.

El sentido en que comienza a moverse la aguja imantada no es caprichoso, porque si invertimos la corriente en el conductor se invierte también el movimiento giratorio de la aguja *NS*.

Este es el llamado fenómeno de Oersted, descubierto en 1820, que, como se ve, relaciona la electricidad con el magnetismo, siendo un gran argumento en favor de la energía única.

La acción directiva de la corriente sobre la aguja imantada constituye el fundamento de la teoría del electromagnetismo, en el cual están basados casi todos los actuales procedimientos de producción, transformación y aprovechamiento de la energía eléctrica.

El estudio del electromagnetismo es eminentemente matemático. Dentro de los límites impuestos a este libro, pocas serán las fórmulas que podamos justificar; pero dejaremos establecidas todas las que juzguemos necesarias para ulteriores estudios, aun cuando el lector deba resignarse a aceptarlas como empíricas.

Regla de Ampere. Hemos dicho que cuando la corriente influye sobre la aguja imantada, el sentido en que empieza ésta a moverse no es caprichoso. Puede determinarse mediante la llamada regla de Ampere.

Este físico *personifica la corriente*, suponiendo en el conductor un observador colocado de manera que la corriente le entre por los pies y le salga por la cabeza y mirando a la aguja.

Al pasar la corriente por el conductor el observador de Ampere verá siempre desviarse el polo norte de la aguja hacia su izquierda.

También puede determinarse el sentido de la desviación mediante la siguiente regla, que es una simplificación de la de Ampere:

Sobre el conductor se tiende la mano derecha, en el sentido de la corriente, y con la palma mirando a la aguja, el dedo pulgar marca siempre la dirección del polo norte de la aguja.

Campo magnético debido a una corriente recta.

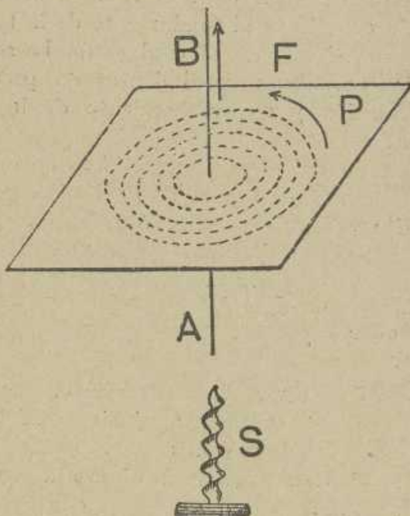


Fig. 31

Se explica el fenómeno de Oersted y se justifica la regla de Ampere, admitiendo que el paso de una corriente por un conductor crea alrededor de éste un campo magnético, cuyas líneas de fuerza son circunferencias situadas en planos perpendiculares al conductor con el centro en el conductor mismo.

Este campo no es puramente ideal, como obedeciendo a una necesidad teórica, sino que puede verse, disponiendo horizontalmente un papel espolvoreado de limaduras de hierro, atravesado por un conductor vertical, según hace ver la figura 31.

Se lanza la corriente al conductor AB; se mueve ligeramente el papel P, y se verá que las limaduras se colocan en círculos concéntricos, que marcan la dirección de las líneas de fuerza.

Es evidente que en este campo magnético las superficies equipotenciales serán planos verticales pasando por el conductor, ya que han de cortar normalmente a las líneas de fuerza (capítulo II).

Regla de Maxwell. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza, dió Maxwell una regla conocida con el nombre de *regla del sacacorchos.*

Supongamos que un sacacorchos S se coloca en la dirección del conductor y se hace girar de manera conveniente para que avance en el sentido de la corriente. La rotación necesaria para este objeto será el sentido de las líneas de fuerza.

Es evidente que una aguja imantada, colocada donde está la flecha F, tenderá a ponerse tangente a las líneas de fuerza del campo, poniendo el polo norte en la punta de la flecha y el polo sur en la cola, es decir, llevando su punta norte a la parte sur del campo.

Obsérvese que siendo ascendente la corriente eléctrica considerada en la figura, y colocando la aguja imantada donde está la flecha F, el lector ocupa exactamente la situación del observador de Ampere, y ve desviarse hacia la izquierda la punta norte de la aguja imantada; luego las reglas de Ampere y de Maxwell están perfectamente de acuerdo, como debía suceder.

Intensidad del campo. En el campo de fuerza debido a una sola masa activa, la actividad de esta masa ejerce su influjo en todas direcciones; podríamos decir que se distribuye en capas esféricas concéntricas; luego la intensidad en distintos puntos del campo debe estar en razón inversa de las superficies de estas capas esféricas, es decir, en razón inversa del cuadrado de los radios, y así nos lo dice, efectivamente, la ley de Newton (capítulo II).

Si la masa activa tiene forma rectilínea indefinida, como sucede en el caso de una corriente eléctrica, el influjo de esta masa debe distribuirse en capas cilíndricas, concéntricas, cuyo eje común sea el conductor, y, por tanto, la intensidad en los diversos puntos del campo debe estar en razón inversa de los radios, y viene dada por la fórmula

$$\mathrm{H} = \frac{2i}{r}$$

Esta intensidad, obrando sobre un polo de masa m, ejercerá una fuerza

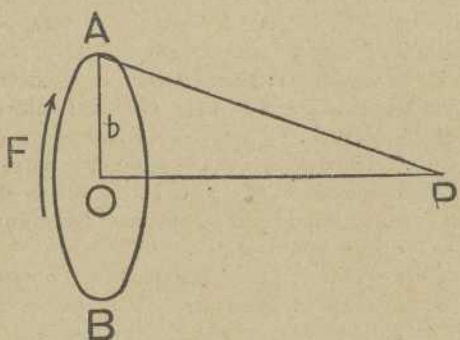
$$F = m\mathrm{H} = \frac{2mi}{r}$$

Cuando la corriente estaba fija y un polo norte podía moverse, se movía inclinándose hacia la izquierda del observador de Ampere. Para conservarse este movimiento relativo, cuando el polo norte esté fijo y la corriente pueda moverse, se moverá llevando al observador de Ampere hacia su derecha.

Campo creado por una corriente circular. Consideremos una corriente eléctrica recorriendo un conductor circular AB (fig. 32) de radio b con un sentido de circulación indicado por la flecha F.

El lector ocupa exactamente la posición de un observador de Ampere colocado en F, luego verá moverse hacia la izquierda un polo norte situado en O.

El conductor AB tiene una longitud $2\pi b$, y animado por una corriente i, equivale a una masa ac-



Fig, 32

tiva $2\pi bi$, de manera que su acción sobre el punto O, o sea la intensidad del campo en O, será

$$\mathrm{H}_0 = \frac{2\pi bi}{b^2} = \frac{2\pi i}{b}$$

Si en lugar de considerar el punto activo en O le consideramos en otro punto cualquiera del eje, en P por ejemplo, que diste c del circuito, se calcula la intensidad H_p del campo en este punto, multiplicando la del centro por la relación $\frac{b^3}{c^3}$. Así:

$$\mathrm{H}_p = \mathrm{H}_0 \frac{b^3}{c^3} = \frac{2\pi i}{b}\,\frac{b^3}{c^3} \quad \frac{2\pi i b^2}{c^3}$$

Analogía entre un circuito cerrado y un imán laminar. El circuito cerrado AB ejerce sobre una aguja magnética situada en O o en P la misma acción que ejercía un imán; luego *en estudios de electromagnetismo se podrá substituir un circuito cerrado por un imán laminar u hoja magnética cuyo contorno tenga la misma forma del circuito.*

Para esta substitución tendremos que distinguir en el circuito sus caras norte y sur mediante las consideraciones siguientes: El polo norte, situado en O, se desvía hacia la izquierda del observador de Ampere colocado en F. Este sentido del desvío nos indica la dirección del flujo magnético del imán laminar AB; luego será cara norte del imán la que queda a la izquierda del observador, que es el lector, y cara sur la que queda a la derecha.

De otro modo puede decirse: *Al considerar un circuito cerrado como una hoja magnética será cara sur aquella en la cual veamos circular la corriente en el sentido en que giran las agujas de un reloj.*

Circuito móvil. Si un circuito puede moverse libremente en un campo magnético, se moverá para orientarse, como imán que es, buscando con su cara norte la parte sur del campo, y con su cara sur la parte norte del campo. Teniendo en cuenta que las líneas de fuerza del campo magnético, o flujo magnético, salen de la parte norte del campo, se enuncia este principio en la forma siguiente:

Un circuito que puede moverse libremente en un campo, se orienta siempre buscando un máximo de flujo por su cara sur.

La proposición anterior sirve de fundamento a la teoría de los electromotores.

Trabajo debido a un circuito. Si un circuito se mueve en un campo es porque existe una fuerza que le obliga a ello; y existiendo fuerza y camino recorrido, se consumirá un trabajo.

Este trabajo J debe depender de la intensidad i que anime al circuito, de su superficie s y de la intensidad H del campo magnético en que se mueve. Tendremos, por tanto,

$$J = is\mathrm{H}$$

Recordemos (capítulo II) que el producto de la intensidad por la superficie es el flujo, y podremos transformar la fórmula última en

$$J = i\mathrm{N}$$

la cual nos dice que, *cuando un circuito se mueve en un campo magnético, produce un trabajo expresado mediante el producto de la intensidad de la corriente por el flujo cortado.*

Así se calcula el trabajo producido por un electromotor.

Las relaciones entre la energía mecánica y la energía eléctrica son siempre recíprocas; de manera que *si enviamos corriente eléctrica a un conductor para que se mueva en un campo y obtenemos trabajo mecánico, también podremos gastar trabajo mecánico en mover un conductor en un campo para obtener en él una corriente eléctrica.*

La primera transformación, de corriente en trabajo, se realiza en el motor eléctrico, y la segunda, de trabajo en corriente, se realiza en las dínamos.

Existiendo esta correlación en las transformaciones podemos aceptar como relación entre el trabajo y la corriente eléctrica la fórmula establecida anteriormente

$$J = i\mathrm{N}$$

cualquiera que sea el sentido de la transformación de energía, es decir, lo mismo para los motores que para las dínamos.

Carrete multiplicador. Hasta ahora, cuando hemos hablado de circuito eléctrico hemos supuesto que estaba formado por una sola espira de alambre conductor; pero en las máquinas y aparatos eléctricos, cuando se disponen circuitos destinados a crear campos magnéticos, o a ser influídos por ellos, se forman los circuitos de varias vueltas, en número cualquiera, N, y bastante juntas unas a otras para despreciar sus distancias relativas.

El conjunto de las vueltas constituye el carrete multiplicador o carrete eléctrico.

Los efectos de N vueltas que obran simultáneamente, deben ser N veces mayores que el efecto de una sola vuelta; de manera que si antes hemos establecido las fórmulas

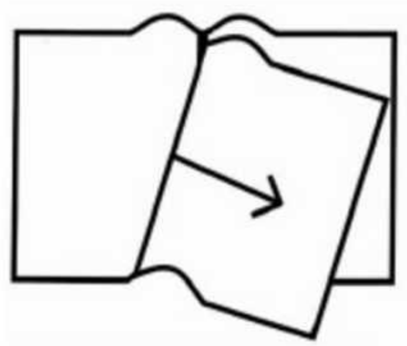
$$\mathrm{H}_0 = \cancel{N}\frac{2\pi i}{b} \qquad \mathrm{H}_p = \frac{2\pi i b^2}{c^3} \qquad J = i\mathrm{N}$$

para expresar la intensidad del campo magnético, creado por un circuito y el trabajo mecánico debido a una corriente, cuando consideremos un carrete con N vueltas, deberemos admitir las expresiones

$$\mathrm{H}_0 = N\frac{2\pi i}{b} \qquad \mathrm{H}_p = N\frac{2\pi i b^2}{c^3} \qquad J = Ni\mathrm{N}$$

La expresión de **H** puede modificarse para conseguir una forma más cómoda y de más fácil aplicación en la teoría de los galvanómetros a la cual se aplica.

Observemos que, siendo b el radio de una vuelta



FALTAN DOCUMENTOS
(paginas, cuadernillos...)
ISO 9878/1990

CAPITULO VIII

Electroimanes

Solenoides. Si sobre un cilindro circular se enrolla en hélice un hilo conductor, de manera que las vueltas sucesivas queden muy próximas unas a otras, pero aisladas entre sí, constituiremos lo que se llama un solenoide. En lugar de tomar como núcleo para el devanado un cilindro, se puede tomar un cuerpo toral, un sólido en forma de anilla, y el eje del solenoide será en este caso circular.

Generalizando esta idea, se define el solenoide como *una serie de circuitos circulares muy próximos unos a otros y normales a un eje rectilíneo o curvilíneo que pasa por sus centros.*

Cuando todos los circuitos componentes del solenoide estén animados por una corriente, cada uno de ellos podrá considerarse como una hoja magnética y todos ellos tendrán la cara norte a un mismo lado, resultando, por tanto, sumados en serie sus efectos.

Esta serie de hojas o imanes laminares producirán iguales efectos que una barra imantada, creando en su interior un campo magnético y señalándose en sus extremos los polos de intensidad mayor que la región central o neutra.

Intensidad media. Si llamamos m al número de espiras que forman el solenoide, b al radio de una espira y l a la longitud del solenoide puede expresarse la intensidad media del campo existente dentro del mismo, por la fórmula

$$H = \frac{4\pi mi}{b + \sqrt{b^2 + l^2}}$$

Generalmente los solenoides son delgados y largos, pudiéndose despreciar el radio b, comparado con su longitud l. Con esta abreviación se toma como fórmula aproximada de la intensidad media la siguiente:

$$H = \frac{4\pi mi}{l} \quad [1]$$

Si la intensidad de la corriente quiere ponerse en amperios, la fórmula práctica será

$$H = \frac{4\pi mi}{10l}$$

Así, por ejemplo, un solenoide de 15 centímetros de largo, formado por 350 espiras, y animado por una corriente de 3 amperios, producirá una intensidad magnética media de

$$H = \frac{4\pi \times 350 \times 3}{10 \times 15} = 88 \textit{ gausios}$$

Electroimán. Si dentro de un solenoide se introduce un núcleo de hierro dulce, éste se imanta por la influencia del campo y permanece imantado todo el tiempo que dure el paso de la corriente por las espiras del solenoide.

Al conjunto de solenoide y núcleo se le da el nombre de electroimán, y sus funciones son las de un imán, pero temporal, es decir, que podemos imantar, desimantar o imantar en sentido contrario, completamente a nuestro gusto.

El electroimán es, sin duda alguna, el órgano más importante para la constitución de máquinas y aparatos eléctricos.

No hay ningún inconveniente en que el núcleo de un electroimán sea perfectamente secto; pero, en tal caso, el flujo magnético debido al carrete ha de cerrar su circuito a través del aire, y este elemento sabemos ya (capítulo III) que es poco permeable a las líneas de fuerza.

En telecomunicación se emplea siempre el electroimán para que, actuando sobre una pieza de hierro dulce, lo atraiga y determine un movimiento. A esta pieza de hierro dulce se le llama *armadura del electroimán.*

Un electroimán recto no puede actuar sobre su armadura más que mediante uno de sus extremos.

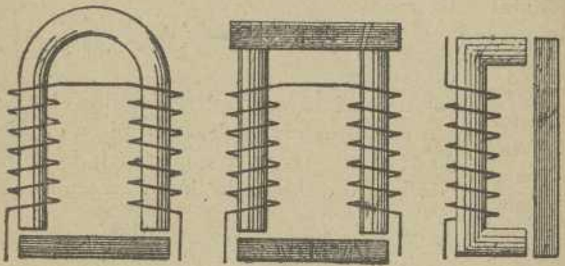
La forma más generalmente empleada para los electroimanes de telecomunicación es la llamada *electroimán en herradura*, que consiste en dos cilindros paralelos, unidos por sus bases mediante una semicircunferencia (fig. 33, I) o mediante un prisma perpendicular a ellos (II). A la semicircunferencia o al prisma se le llama culata del electroimán.

La armadura está constituída por una pieza de hierro dulce, prismática o cilíndrica, y cuya longitud es igual a la distancia entre las superficies laterales exteriores de los núcleos.

En los electroimanes en herradura actúan sobre la armadura los dos polos simultáneamente y, por tanto, el efecto total es doble que el producido por un electroimán recto.

Carretes magnetizantes. Los circuitos eléctricos constitutivos del solenoide que ha de crear el campo magnético para imantar los núcleos forman el carrete magnetizante.

Este carrete puede colocarse en cualquier punto del circuito magnético. Generalmente se parte en dos mitades que se ponen envolviendo los dos núcleos cilíndricos paralelos (fig. 33, I y II); pero también hay casos en que se pone todo el devanado formando



I II III

Fig. 33

un solo carrete, enrollado en la culata del electroimán (III).

Para decidirse por una u otra colocación del carrete, debe tenerse en cuenta que las líneas de fuerza del flujo magnético, lo mismo que las corrientes eléctricas, tienden siempre a cerrar su circuito por el camino más corto; de manera que, si el carrete magnetizante está lejos de los extremos del núcleo, se corre el peligro de que las líneas de fuerza, al salir de un extremo del carrete, salten por el aire para entrar por el otro, sin recorrer la longitud total del núcleo, y, por tanto, sin contribuir al efecto atractivo sobre la armadura. A esta pérdida de líneas de fuerza se le llama *dispersión del flujo.*

Devanado. Los carretes magnetizantes se devanan unas veces sobre los mismos núcleos, y otras veces apoyados en carretes de madera, cartón o metal. En este último caso se recubre el carrete con un aislador antes de empezar el devanado. Generalmente las capas sucesivas de conductor tienen todas el mismo número de vueltas, con lo cual el carrete resulta de forma cilíndrica. Cuando el carrete puede calentarse fuertemente, por un efecto Joule exagerado, como sucede con los electroimanes inductores de las dínamos, se varía el número de vueltas por capa, de manera que la forma exterior del carrete resulta compuesta de un cilindro, unido por sus bases a las bases mayores de dos troncos de cono. Con esta disposición se aumenta notablemente la superficie exterior por donde el carrete se enfría.

Los conductores para devanar carretes son generalmente de cobre, de buena conductividad, y recocido para que sea blando y de fácil manejo.

El aislamiento que debe recubrir los hilos depende de la tensión a que ha de someterse el carrete. Consiste en dos o más capas de algodón, trenzadas en sentido contrario, con adición, algunas veces, de cubiertas de goma, cintas embreadas, etc. Para conductores de poco diámetro se emplea actualmente con gran éxito el *hilo esmaltado*, cubierto de un verdadero esmalte, negro brillante, aislador, y tan flexible que pueden formarse con el hilo vueltas de muy pequeño diámetro o ángulos muy agudos, sin que el esmalte se resquebraje. Para grandes diámetros el resultado no es tan satisfactorio.

El aluminio empieza a substituir al cobre como conductor en muchas aplicaciones eléctricas. Una propiedad notable de este metal es que su óxido presenta una resistividad elevadísima, y precisamente esta propiedad se ha utilizado, según veremos en tomos sucesivos, para algunas interesantes aplicaciones, como son las válvulas electrolíticas, los pararrayos electrolíticos, etc., etc.

Si se oxida de un modo uniforme la superficie exterior de un conductor de aluminio, puede éste emplearse para devanar carretes magnetizantes, sin más cubierta aisladora que su capa de óxido.

La sección conductora de los hilos para carretes se calcula teniendo en cuenta la intensidad que los ha de recorrer, fijando un número de amperios por milímetro cuadrado, que se llama *densidad de corriente*, y que varía de 0,5 a 3 según que los carretes hayan de resultar más o menos gruesos, y, sobre todo, según se trate de carretes fijos o de carretes movibles.

En algunas máquinas generadoras o transformadoras de corriente eléctrica se exigen secciones conductoras tan exageradas que no es posible conseguirlas con hilos cilíndricos ni prismáticos, y, en tal caso, se recurre al empleo de láminas de cobre, aislando unas vueltas de otras, mediante la interposición de hojas de cartón aislador.

Cuando los carretes han de sufrir grandes tensiones, como sucede con los destinados a transformadores, se aisla cuidadosamente una capa de otra al devanar, interponiendo telas aisladoras preparadas con este fin. Además, para evitar que los aislantes puedan retener alguna humedad que los deteriore con el tiempo, o al menos que disminuya su rigidez, se desecan los carretes, después de devanados, en hornos especiales a 100 ó 110 grados de temperatura.

Estos carretes para tensión, después de desecados, se forran con cintas o telas aisladoras y se barnizan exteriormente a la laca. Finalmente, la rigidez dieléctrica de los aislantes se prueba sometiendo los carretes a una tensión cuádruple o quíntuple de la que normalmente han de soportar.

Calentamiento de los carretes. Para calcular la resistencia del conductor empleado en un devanado, dan suficiente aproximación las fórmulas siguientes:

$$r = 0'02 \frac{l}{s} \textit{ para el cobre}$$

$$r = 0'03 \frac{l}{s} \textit{ para el aluminio}$$

siendo r ohmios; l, metros de longitud, y s, milímetros cuadrados de sección.

Esta resistencia de los conductores produce un efecto Joule que almacena calorías en el carrete y determina en él mayor o menor elevación de temperatura, según la superficie exterior del carrete, por donde puede enfriarse, y sus condiciones de funcionamiento, sobre todo, su quietud o movilidad.

Un carrete fijo ha de tener una superficie de enfriamiento que corresponda de 10 a 20 centímetros cuadrados por vatio transformado en calor. En los carretes movibles puede tolerarse una superficie de enfriamiento algo menor.

La temperatura alcanzada por un carrete se calcula mediante la fórmula empírica

$$t = \frac{300\,W}{s\left(1 + \frac{v}{10}\right)}$$

siendo t grados centígrados sobre la temperatura ambiente; W, vatios transformados en calor; s, superficie de enfriamiento, y v, velocidad, en metros por segundo, de un punto de la superficie exterior del carrete.

Es claro que si el carrete funciona sin moverse se tendrá $v = o$, y la fórmula anterior se reducirá sencillamente a

$$t = \frac{300\,W}{s}$$

La temperatura tolerada en los carretes durante su funcionamiento es, en general, de 40 a 60 grados sobre el ambiente. Si son de temer mayores temperaturas, debe recurrirse a disposiciones especiales para conseguir su enfriamiento, como son los ventiladores, recipientes con tiro de aire, baños refrigerantes, etc.

Circuito magnético. La intensidad magnética media, creada en el interior del solenoide, hemos visto, fórmula [1], que era

$$\mathrm{H} = \frac{4\pi m i}{l}$$

Las líneas de fuerza correspondientes a esta intensidad marchan axialmente por el centro del solenoide y saliendo por una de sus caras entran por la otra siguiendo exteriormente siempre el camino más corto. El camino completo recorrido por las líneas de fuerza del campo magnético forma en todos los casos un circuito cerrado que se denomina *circuito magnético.*

Cuando el solenoide carece de núcleo, el circuito magnético es en su totalidad de aire, pero si el solenoide o carrete forma parte de un electroimán (figura 33) el circuito magnético está formado por la culata, núcleos y adornava, siendo todo él de hierro, mientras la armadura esté pegada a los núcleos, que en cuanto ésta se separa de ellos quedan intercaladas en el circuito dos zonas de aire, entre armadura y núcleos, que son conocidas con el nombre de *entrehierro.*

La intensidad **H** producida por el solenoide de un electroimán al actuar sobre el núcleo de hierro dulce, μ veces más permeable que el aire, produce una inducción (capítulo III).

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}\mu = \frac{4\pi m i \mu}{l}$$

y circulando estas líneas de fuerza a través de una sección *s*, crean un flujo,

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}s = \frac{4\pi m i \mu s}{l}$$

Este flujo magnético que circula por el núcleo del electroimán se compara para su estudio con el flujo eléctrico o corriente eléctrica que circula por un conductor, y para ello se transforma su fórmula de este modo:

$$\mathbf{N} = \frac{4\pi m i}{\frac{l}{\mu s}}$$

o bien, representando por **F** el numerador y por **R** el denominador:

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{R}}$$

fórmula que comparada con la ley de Ohm, aplicada en los circuitos eléctricos (capítulo VI),

$$I = \frac{E}{R}$$

nos permite sacar las siguientes analogías entre los circuitos eléctricos y los magnéticos:

1.ª La corriente I que circula por un conductor eléctrico es análoga al flujo **N** que recorre un circuito magnético.

2.ª La corriente eléctrica I depende directamente de la *fuerza electromotriz* E producida por el generador, químico o mecánico (capítulo VI), aplicado en el circuito; así como el flujo **N** de un circuito magnético es directamente proporcional a **F**, que por analogía llamaremos *fuerza magnetomotriz*, y que producida por los carretes montados sobre los núcleos del circuito determina la circulación de flujo, como la fuerza electromotriz determinaba la circulación de corriente en el circuito eléctrico. Su valor es

$$\mathbf{F} = 4\pi mi$$

3.ª El obstáculo que dificulta el paso de la corriente eléctrica es la *resistencia óhmica* de los conductores

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

y la cantidad inversa al flujo es el denominador

$$\mathbf{R} = \frac{l}{\mu s}$$

que por representar la dificultad que encuentra el flujo en el circuito magnético lo llamaremos por analogía *reluctancia* o *resistencia magnética*.

En resumen: la *fuerza magnetomotriz* y la *reluctancia* son en el circuito magnético lo que la *fuerza electromotriz* y la *resistencia* en el circuito eléctrico.

Así como la unidad de flujo es el *maxvell* o *maxvelio*, la unidad de fuerza magnetomotriz es el *gilbert* y la reluctancia el *oersted*. La ley de Ohm aplicada a un circuito magnético dice

$$maxvel = \frac{gilbert}{oersted}$$

Esta fórmula nos permite dar la siguiente definición: *un maxvell es el flujo que produce un gilbert a través de un oersted.*

La expresión de la fuerza magnetomotriz se compone de dos factores: un coeficiente numérico 4π, y el producto mi, al cual se le da el nombre de *amperiovueltas.*

La reluctancia R es como la resistencia eléctrica, proporcional a la longitud l del conductor, e inversamente proporcional a la sección del mismo.

Reluctividad o reluctancia específica de una substancia cualquiera, es la reluctancia que presenta un cubo construído de esta substancia, que tenga por arista la unidad lineal. Según esta definición, la fórmula de la reluctancia, haciendo $l = 1$ y $s = 1$, nos dará para valor de la reluctividad

$$r = \frac{1}{\mu}$$

es decir, el inverso del coeficiente de permeabilidad (capítulo III).

Finalmente, llamaremos *permeancia* de un conductor magnético a la inversa de la reluctancia, es decir, a la expresión

$$\gamma = \mu \frac{s}{l}$$

En resumen: las características de un circuito eléctrico, *resistencia*, *resistividad*, *conductancia* y *conductividad*, equivalen en un circuito magnético a la *reluctancia*, *reluctividad*, *permeancia* y *permeabilidad*.

Sin embargo, entre el circuito eléctrico y el circuito magnético existen notables diferencias.

La circulación de una corriente eléctrica exige un conductor continuo, y sólo como caso excepcional y en circunstancias especiales, salva espacios ocupados por el aire. La circulación de un flujo magnético no exige conductor continuo, y en casi todos los casos se completa el circuito con alguno o algunos espacios de aire.

Pero la diferencia esencial entre circuitos eléctricos y magnéticos está en la resistividad de los primeros y reluctividad de los segundos. La resistividad de una substancia es siempre la misma, con absoluta independencia de la corriente eléctrica que circule por ella; mientras la reluctividad y permeabilidad de una substancia dependen de la intensidad del campo magnético que influya en ella (capítulo III). Así, por ejemplo, cuando se dice que el cobre tiene una resistividad de 1,6 microhmios-centímetro no se alude para nada a los amperios que puedan pasar por él; pero cuando se habla de permeabilidad del acero, se dice: tiene un coeficiente de permeabilidad de 2500 cuando está sometido a una inducción de 5000 gausios; tiene un coeficiente de 90, cuando la inducción es de 18000; etc., etc.

Circuitos magnéticos compuestos. Las leyes de las resistencias compuestas y las de Kirchoff, establecidas para los circuitos eléctricos compuestos, tienen sus equivalentes en los circuitos magnéticos. Así, se dice:

La reluctancia compuesta de varias reluctancias unidas en serie es igual a la suma de las reluctancias componentes.

En un circuito magnético cualquiera, compuesto de varios conductores, la suma algebraica de fuerzas magnetomotrices es igual a la suma algebraica de productos de flujos por reluctancias.

Cálculo de amperiovueltas. La fórmula del flujo establecida al estudiar el circuito magnético,

$$\mathbf{N} = \mathbf{B}s = \frac{4\pi mi\mu s}{l}$$

nos da para valor de los amperiovueltas

$$mi = \frac{\mathbf{B}l}{4\pi\mu}$$

pero esta fórmula, como todas las deducidas del cálculo, está expresada en unidades teóricas cegesimales. Preparada para emplearla con unidades prácticas se transforma en

$$mi = 0{`}8\,\frac{\mathbf{B}l}{\mu}$$

Haciendo l igual a la unidad, se tienen los amperiovueltas necesarios para cada centímetro de longitud,

$$mi = 0{`}8\,\frac{\mathbf{B}}{\mu}$$

Los valores de **B** y μ, que corresponden a una substancia cualquiera, son, en general, difíciles de determinar, y para las necesidades de la práctica basta la aproximación que se obtiene aceptando de los formularios los valores de *amperiovueltas necesarios para mantener una inducción dada,* **B**, *en un* *conductor de un centímetro de longitud*, y multiplicando este número por la longitud del conductor que se desee.

He aquí algunos de estos valores:

B	M. I. POR CM.			
	Aire	Fundición	Hierro dulce	Acero
1.000	800			2‘1
2.000	1.600			2‘6
3.000	2.400			3‘8
4.000	3.200	4‘0		4‘7
5.000	4.000	8‘0	1‘6	5‘5
6.000	4.800	17‘2	1‘95	6‘1
7.000	5.600	33‘6	2‘3	7‘1
8.000	6.400	64‘0	2‘7	8‘1
9.000	7.200	101‘6	3‘2	9‘0
10.000	8.000	150‘4	4‘0	10‘0
11.000		233‘6	5‘2	11‘4
12.000			6‘8	13‘1
13.000			9‘6	15‘9
14.000			10‘6	20‘1
15.000			22‘8	27‘4
16.000			41‘6	39‘4
17.000			84‘0	61‘5
18.000			160‘0	97‘7
19.000			280‘0	142‘0
20.000				203‘5

Para dar idea del uso que se hace de estos valores y de la fórmula última, resolveremos un caso práctico numérico.

EJEMPLO. El circuito magnético de una dínamo de corriente continua está constituído por un segmento *A* de su inducido (fig. 34); dos trayectos *EE'*, de aire, que corresponden al entrehierro; dos trayectos *P*, *P'*, de piezas polares; dos trayectos *I*, *I'*, de núcleos inductores, y un segmento *C*, de culata. Por este circuito debe circular un flujo magnético, cuyas líneas de fuerza seguirán un camino medio señalado en la figura por una línea de puntos.

Supongamos que las inducciones que deben mantenerse en las distintas partes del circuito magnético son las señaladas en la tercera columna del

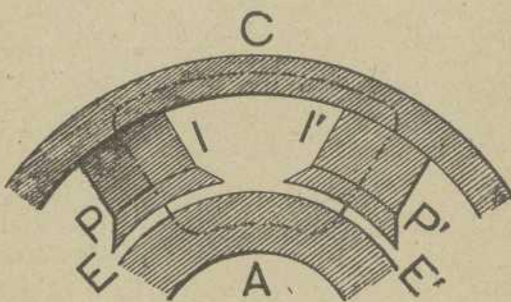


Fig. 34

cuadro siguiente, y las longitudes en cada una de aquellas partes las consignadas en la cuarta columna. Para las inducciones consignadas corresponden los números de amperiovueltas por centímetro de longitud, que constan en la quinta columna.

Piezas	Material	Inducción	Longitud	mi/cm.	mi/l.
Armadura..	Hierro dulce	7.000	32	2'3	72'6
Entrehierros	Aire.........	5.000	1'4	4.000	5.600
Piezas polares........	Fundición...	9.000	4	101'6	406'4
Núcleos.....	Fundición...	10.000	70	150'4	10.528
Culata......	Acero.......	15.000	78'5	27'4	2.150'5
Amperiovueltas..............					13.757'5

Multiplicando los números de la cuarta por los de la quinta se obtienen los de la sexta, que son los amperiovueltas precisos para mantener las inducciones fijadas en las distintas piezas, teniendo en cuenta sus longitudes.

La suma de la última columna nos da los amperiovueltas totales para el circuito magnético considerado:

$$mi = 13.757$$

Es claro que de este producto puede fijarse arbitrariamente uno de los factores, las vueltas o los amperios, y determinar el valor del otro factor.

Si en el circuito magnético de la dínamo considerada se hubiera de mantener la imantación de las piezas polares mediante una corriente de 20 amperios, el número de vueltas para revestir los electroimanes sería

$$m = \frac{13.757}{20} = 687'8$$

Fuerza soportante de un electroimán. Colocando cerca de los polos de un electroimán una pieza de hierro dulce, llamada generalmente *armadura*, se imanta ésta por influencia, presentándose frente a los polos norte y sur del electroimán, polos sur y norte en la armadura. Estas masas magnéticas de nombre contrario se atraen, y su acción mutua es sencillamente un efecto de presión superficial, como el estudiado en el capítulo II, y que en este caso particular recibe el nombre de *fuerza soportante*, entendiendo por tal *el máximo peso que puede sostener la armadura*, sin desprenderse del electroimán.

Partiendo de las dos fórmulas que allí dimos de la presión superficial, teniendo en cuenta las dimensiones de los núcleos (longitud, l, y sección, s) y sus cualidades magnéticas (permeabilidad, μ, e inducción, **B**), se establecen las siguientes relaciones entre estas cantidades, la fuerza soportante p y los amperiovueltas mi necesarios para conseguirla

$$mi = 125 \frac{l}{\mu} \sqrt{\frac{p}{s}}$$

$$s = 24.650 \frac{p}{\mathbf{B}^2}$$

Cálculo de un electroimán. Estas dos últimas fórmulas permiten calcular un electroimán para conseguir una fuerza soportante dada.

Con objeto de simplificar las fórmulas y facilitar, por tanto, los cálculos, hemos tomado un valor fijo para **B**, 16000 gausios, que es la inducción media a que puede someterse el hierro dulce empleado para la construcción de núcleos, y la permeabilidad correspondiente, que es $\mu = 308$. y con estos valores se consiguen las fórmulas más sencillas:

$$mi = 40l \qquad [1]$$

$$s = \frac{p}{10^4} \qquad [2]$$

con las cuales se obtienen siempre resultados suficientemente aproximados.

Para calcular un electroimán de fuerza soportante dada, p, se determina la sección s que corresponde a sus núcleos, mediante la ecuación (2). Se fijan arbitrariamente las longitudes de estos núcleos, de la culata y de la armadura, y dibujando a escala todas las piezas podrá medirse la longitud media l del circuito magnético.

La fórmula [1] nos determinará el número mi de amperiovueltas necesarios para la excitación del electroimán.

El producto mi puede descomponerse en dos factores, m e i, de muy diversas maneras. Si se nos impone el valor de uno de ellos, determinaremos el otro, y si no se nos impone ninguno, los fijaremos arbitrariamente.

Conocida la intensidad de corriente i, se escoge el conductor para formar los carretes de manera que por el cobre circule la corriente con una *densidad* de 0,5 a 1 amperios por milímetro cuadrado. Si se pasa de este valor el carrete se calienta excesivamente.

Escogido el hilo de cobre, se calcula fácilmente el diámetro que tendrá después de aislado y el sitio que ocupará sobre los núcleos el carrete formado. Al llegar a este punto del proyecto, se verá si se escogieron con acierto las dimensiones de núcleos, culatas y armaduras, y, en caso negativo, rectificaremos aquellas dimensiones según convenga.

EJEMPLO. *Proyectar un electroimán que con* 10 *amperios soporte* 100 *kilogramos de peso.*

Para la fuerza soportante $p = 10$, la fórmula [2] nos dará una sección de contacto entre el núcleo y la armadura de

$$s = \frac{100.000}{10^4} = 10 \text{ cm.}^2$$

Construyendo el electroimán en forma de herradura, trabajan simultáneamente los dos polos y, por tanto, a cada uno le corresponderá una sección de 5 centímetros cuadrados. Dando al núcleo forma cilíndrica deberá tener un diámetro de 3 centímetros próximamente.

Fijemos ya las dimensiones de los núcleos con sujeción a la forma de electroimán representada en la figura 35.

Daremos a los núcleos una longitud total de 20 centímetros. La culata la construiremos de manera que los centros de los núcleos disten 15 centí-

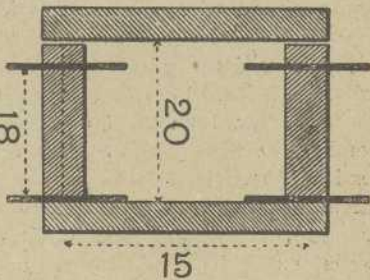


Fig. 35

metros. La armadura tiene igual longitud que la culata.

La longitud total del circuito magnético será, próximamente, $l = 75$ centímetros, y la fórmula [1] nos dará

$$mi = 40 \times 75 = 3.000 \; amp. \, v.$$

Pero fijándose en el enunciado del proyecto la intensidad $i = 10$ amperios, el número de vueltas de hilo que deben revestir los núcleos será

$$m = \frac{3.000}{10} 300 \; vueltas$$

Con objeto de evitar efectos de dispersión del flujo y dar al electroimán una forma simétrica, colocaremos 150 vueltas en cada rama.

Para formar los devanados tomemos carretes huecos, limitados por platillos circulares, como se indica en la figura, que dejen un espacio libre para la colocación del hilo de 18 centímetros.

Tomemos un hilo cuyo cobre tenga 4 milímetros de diámetro, que corresponde a una sección de 12,5 milímetros cuadrados y a una densidad de corriente de 0,8. Este hilo, después de recubierto por el aislante, alcanzará un diámetro de 6 milímetros; de manera que en los 18 centímetros libres del carrete caben por capa 180 : 6 = 30 vueltas.

Revistiendo cada carrete con 5 capas de hilo conseguiremos las 150 vueltas necesarias.

Para calcular la longitud total del hilo empleado en el devanado, calcularemos la longitud de una vuelta media, es decir, equidistante del núcleo y de la superficie exterior del carrete.

Teniendo nuestro devanado 5 capas de hilo, serán vueltas medias las de la tercera capa. Su diámetro será igual al del núcleo de hierro, más cinco veces el del conductor recubierto.

$$3 + 5 \times 0'6 = 6 \text{ cm.}$$

La longitud de una vuelta será

$$\pi \times 6 = 18'85 \text{ cm.}$$

la de todo el devanado de un carrete,

$$18'85 \times 300 = 56'55 \text{ metros}$$

su resistencia,

$$r = 0'02 \frac{56'55}{12'5} 0'09 \textit{ ohmios}$$

y los vatios perdidos en calor,

$$rI^2 = 0'09 \times 10^2 = 9 \textit{ vatios}$$

El diámetro exterior del carrete será igual al diámetro del núcleo más diez diámetros de hilo recubierto:

$$3 + 10 \times 0'6 = 9 \text{ cm.}$$

la circunferencia exterior,

$$\pi \times 9 = 28 \text{ cm.}$$

y la superficie lateral del carrete,

$$28 \times 18 = 504 \text{ cm.}^2$$

Con todos estos datos la fórmula para calcular la temperatura que alcanza un carrete nos dará

$$t = \frac{300 \times 9}{504} = 5'3 \text{ grados C.}$$

Queda completamente proyectado el electroimán pedido.

Electroimanes para telegrafía y telefonía. Para timbres, telégrafos y teléfonos, se emplean los electroimanes como órganos esencialísimos de su constitución. Estos electroimanes están formados del mismo modo que los estudiados hasta aquí; pero como deben funcionar con intensidades de centésimas y aun milésimas de amperio, forzosamente deben revestirse con muchísimas vueltas de hilo fino, aun cuando sólo se les exige fuerzas soportantes inferiores a 40 gramos.

Si estos electroimanes se calculan por las fórmulas conocidas,

$$mi = 40l \qquad s = \frac{p}{10^4}$$

que corresponden a 16000 gausios de inducción en el hierro dulce de los núcleos, se hallan para éstos unas secciones tan pequeñas que son inaceptables. En efecto, para $p = 40$ gramos se obtiene

$$s = \frac{40}{10.000} = 0'004 \text{ cm.}^2$$

Generalmente se construyen los núcleos de 8 a 10 milímetros de diámetro, y este aumento en el hierro procura alguna reducción en el número de amperiovueltas.

En cambio, el núcleo grueso tiene el inconveniente de conservar mucho magnetismo remanente, ya que éste es proporcional a la masa. El magnetismo remanente hace que el funcionamiento del electroimán sea torpe, porque no queda desimantado por completo cuando cesa la corriente.

Se combate este defecto procurando que el hierro empleado en la construcción sea de la mejor calidad; construyendo los núcleos huecos en lugar de macizos para disminuir su masa, o cortando la culata, con lo cual el electroimán en herradura resulta compuesto de dos electroimanes en ángulo que tienen muy próximos los polos libres de la culata. La acción recíproca de estos polos próximos favorece la vuelta al estado neutro de toda la masa en cuanto cesa la corriente.

Generalmente el hilo que recubre los carretes para electroimanes de telegrafía es de muy poco diámetro y, por tanto, muy expuesto á romperse. Si el principio del devanado deja un cabo de hilo al exterior para recibir comunicación eléctrica, y este cabo se rompe al rape, debe desliarse todo el carrete para dejar nuevo cabo de conexión. Se aminora bastante este peligro poniendo, al empezar el devanado, un trozo de hilo de diámetro mucho mayor, del cual quede el cabo de conexión y las primeras vueltas del devanado.

Todavía es mucho mejor procedimiento el de soldar al núcleo el principio del devanado y no dejarle más cabo libre que el final. Haciéndolo así en los dos carretes de un electroimán, la comunicación entre ellos se establece a través del hierro dulce de los núcleos; y si la culata se corta, como se ha indicado anteriormente, deberá conservarse la continuidad, interponiendo en la sección una lámina de metal no magnético, de cobre, por ejemplo, que sea un impedimento para la circulación del flujo remanente, pero que no lo sea para la circulación de la corriente eléctrica.

La resistencia más conveniente para el devanado de un electroimán es la que haga igualmente resistentes los carretes y el resto del circuito. Por eso los timbres empleados como llamadores domésticos tienen una resistencia de 4 a 10 ohmios; los empleados en redes telefónicas urbanas tienen 50 ohmios, y los empleados en estaciones telegráficas alcanzan hasta 500 ohmios.

Electroimanes con núcleo de succión. Algunos tipos de electroimanes tienen los núcleos partidos, muy próximos a la culata, y unidos a la armadura por la sección de contacto, con objeto de que el movimiento de la armadura vaya acompañado del de los núcleos, que así funcionan como pistones de los carretes inductores.

Este tipo de electroimán, llamado de núcleo de succión, tiene la ventaja de poder tener un entrehierro muy largo, lo cual está indicado cuando se desea obtener en la armadura una carrera larga.

Electroimanes cojos. Los amperiovueltas necesarios para imantar los núcleos de un electroimán, se reparten por igual entre los dos devanados, como hemos hecho en el ejemplo numérico resuelto, lo cual tiene como principal ventaja el evitar la dispersión del flujo.

Pero en algunos modelos de aparatos telegráficos, ingleses principalmente, se asignan los amperiovueltas todos a una sola rama, resultando ésta rodeada de devanado y la otra desnuda.

A estos electroimanes se les llama cojos.

Electroimanes polarizados. Hasta ahora hemos supuesto que el núcleo y la armadura del electroimán estaban construídos de hierro dulce y, por tanto, sin polaridad alguna mientras no los excite la corriente.

En algunos aparatos telegráficos modernos, en avisadores magnéticos para centrales telefónicas llamadores, y en otra multitud de casos, se emplean electroimanes en que el núcleo o la armadura son de acero imantado de un modo permanente, razón por la cual se llaman electroimanes polarizados.

Un electroimán polarizado atraerá su armadura mientras por el devanado no pase corriente, o bien, cuando pasando, los polos de los solenoides devanados coincidan con los del núcleo. En cambio, cuando la corriente cree en el devanado polos contrarios a los del núcleo, la armadura se desprenderá. Este es el momento de funcionamiento de estos electroimanes.

En los electroimanes telegráficos los movimientos de la armadura se activan mediante un resorte o muelle que actúa sobre ella, con tensión o presión variable a voluntad.

A estos resortes o muelles se les llama antagonistas.

CAPITULO IX

Inducción y autoinducción

Corrientes inducidas. Si un circuito está recorrido por una corriente, forzosamente se gastará en él una energía eléctrica que, según el principio de conservación de la energía (capítulo primero), debe transformarse en otra energía tomando una de las dos formas: calor o trabajo mecánico.

Sea R la resistencia del circuito; V, la tensión aplicada a sus extremos; I, la intensidad que lo recorre, y t, el tiempo de circulación.

Si el circuito es fijo, toda la energía eléctrica que recibe se transformará en calor, verificándose

$$VIt = RI^2t$$

en virtud de la ley de Joule.

Si el circuito puede moverse en un campo, ya sabemos que se orientará (capítulo VII) desarrollando, por tanto, un trabajo mecánico, además del calentamiento de su conductor. Recordando la expresión del trabajo producido por un circuito (capítulo VII), deberá verificarse la relación

$$VIt = RI^2t + IN$$

siendo N *el flujo cortado por el circuito.*

Dividiendo por It toda la ecuación anterior, se tiene

$$\frac{VIt}{It} = \frac{RI^2t}{It} + \frac{I\mathrm{N}}{It}$$

y suprimiendo los factores comunes en los numeradores y denominadores de cada término, resulta

$$V = RI + \frac{\mathrm{N}}{t}$$

de donde puede deducirse el valor de I,

$$I = \frac{V - \frac{\mathrm{N}}{t}}{R}$$

Esta fórmula recuerda la ley de Ohm (capítulo VI); pero aquí existe en el numerador un término negativo $-\frac{\mathrm{N}}{t}$, homogéneo con V, que viene a reducir el efecto de la tensión aplicada al circuito, por lo cual se dice que obra como *fuerza contraelectromotriz*, y recibe el nombre de *fuerza electromotriz de inducción.*

Observemos en la fórmula anterior que puede existir corriente I sin necesidad de que exista tensión V aplicada al circuito, con tal de que haya *flujo cortado por el circuito* o, en términos más matemáticos, aun cuando se anule la V tendrá valor la I,

$$I = \frac{-\frac{\mathrm{N}}{t}}{R}$$

de donde se deduce el siguiente principio, que puede considerarse como uno de los más importantes, o el más importante quizá de toda la Electrología.

Siempre que un circuito metálico esté atravesado por un flujo variable, nace en el circuito una fuerza electromotriz de inducción que da lugar a una corriente, aun cuando no esté en comunicación con algún generador.

La variación del flujo que atraviesa el circuito puede obtenerse haciendo que éste cambie de forma o de posición en el campo magnético, y la energía

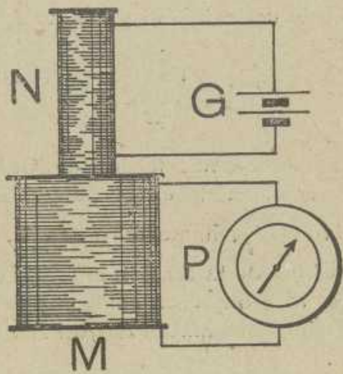


Fig. 36

mecánica consumida en mover el circuito se transformará en energía eléctrica, apareciendo en él una *corriente inducida.*

Inducción en los solenoides. Si en el interior de un carrete M (fig. 36) se introduce otro N, recorrido por una corriente procedente de un generador G, o se introduce un imán permanente, habrá *un aumento de flujo* en las espiras del devanado M;

por tanto, aparecerá en ella una corriente inducida

$$I_1 = -\frac{\frac{\mathbf{N}}{t}}{R}$$

Cuando el carrete movible alcanza el fondo del carrete fijo y cesa en su movimiento, cesa también la variación de flujo **N**; es decir, se anula el numerador de la fórmula anterior y deja de circular la corriente inducida. Tendremos entonces

$$I_2 = 0$$

Saquemos rápidamente el carrete *N* del *M*, con lo cual habrá *una disminución de flujo*, variación, al fin, en las espiras del carrete fijo, y aparecerá nuevamente una corriente inducida; pero esta vez la corriente debe ser de sentido contrario a la primera, ya que antes fué debida a *un aumento de flujo* y ahora lo es a *una disminución*. El sentido contrario de la variación de flujo, como el de la corriente, se expresa matemáticamente mediante un cambio de signo, y, por tanto, la corriente que aparece al sacar el carrete tendrá por fórmula

$$I_3 = \frac{\frac{\mathbf{N}}{t}}{R}$$

Estas consecuencias, deducidas puramente del cálculo, las comprueba la experiencia. En efecto, si los extremos del devanado de *M* se llevan a comunicar con un aparato indicador de corriente cualquiera, *P*, galvanómetro o amperímetro, veremos una desviación de la aguja al introducir el carrete N, tanto más violenta cuanto más rápida sea la introducción.

Si el carrete N permanece quieto en el interior de M, desaparece toda indicación de corriente en P.

Cuando saquemos rápidamente el carrete N, volveremos a observar otra desviación instantánea de la aguja de P; pero en sentido contrario al observado cuando lo introdujimos, conforme nos lo había predicho el cálculo.

Sentido de las corrientes inducidas. La misma fórmula general

$$I = \frac{-\frac{\mathrm{N}}{t}}{R}$$

de donde hemos deducido todas las consecuencias anteriores, nos determina también el sentido de las corrientes inducidas.

Cuando la variación de flujo N *es positiva*, como sucede al introducir el carrete N en el M, el signo — que lleva la fórmula nos dice que *la corriente inducida será contraria a la corriente inductora.*

En cambio, *cuando la variación de flujo* N *es negativa*, es decir, cuando el flujo decrece, como sucede al sacar el carrete N del M, desaparece el signo — de la fórmula por tener otro signo — la cantidad N, y, por tanto, *la corriente inducida es del mismo sentido que la corriente inductora.*

Ley de Lenz. De otra manera puede expresarse lo dicho anteriormente respecto al sentido de las corrientes inducidas.

Si al introducir el carrete N en M las corrientes son de sentido contrario en ambas, en los extremos *inferior de N y superior de M* se crearán polos del mismo signo, que se repelerán y que, por tanto, se opondrán al avance del carrete movible.

Si al sacar el carrete *N* del *M* las corrientes son del mismo sentido en ambas, en los extremos *inferior de N y superior de M* se crearán polos de signos contrarios que se atraerán y que, por tanto, se opondrán a la retirada del carrete movible.

Estas dos deducciones las reunió Lenz en un solo enunciado, que lleva su nombre, y que es como sigue: *En los movimientos relativos de un circuito y un campo magnético, las corrientes inducidas que nacen se oponen siempre al movimiento.*

Regla de Maxwell. Para determinar el sentido de la corriente inducida nacida de un circuito, bastará recordar la definición de *cara sur de un circuito*, cuando se compara con un imán laminar (capítulo VII). Será sur la cara del circuito por donde se vea disminuir el flujo.

Maxwell dió una regla más clara que la anterior, llamada *regla del sacacorchos*, para determinar el sentido de la corriente inducida, y es la siguiente:

Supongamos que el circuito está atravesado por un sacacorchos que avanza en el sentido de las líneas de fuerza del campo magnético. *La corriente inducida será directa, es decir, girará como el sacacorchos cuando el flujo disminuya, y será inversa al movimiento del sacacorchos cuando el flujo aumente.*

Dínamos y transformadores. La aparición de corrientes inducidas en los circuitos metálicos sometidos a la acción de flujo variable es el fundamento de las máquinas industriales para producir corriente eléctrica, llamadas *dínamos*, y de los aparatos destinados a modificar la tensión de las corrientes, llamados *transformadores*.

Una dínamo es, sencillamente, una serie de cir-

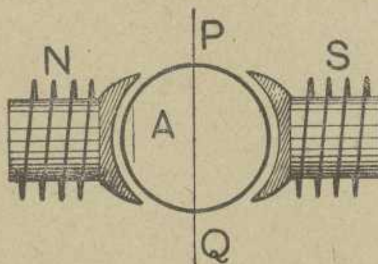


Fig. 37

cuitos como el A (fig. 37), situados en el campo creado entre los polos N, S de un potente electroimán, y en cuyo circuito se mantiene la variación de flujo, haciéndole girar constantemente alrededor de un diámetro PQ. En cada uno de los circuitos se originará una corriente

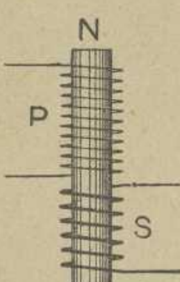


Fig. 38

$$I = \frac{-\frac{\mathbf{N}}{t}}{R}$$

y si todos los circuitos inducidos se montan en serie, la tensión total de la máquina será proporcional al número de circuitos.

Un transformador es solamente el conjunto de dos devanados, P y S (fig. 38), sobre un mismo núcleo magnético. Uno de ellos, llamado *primario o inductor*, está recorrido por una corriente variable en intensidad o en dirección, y crea en el núcleo un flujo variable. En el otro, llamado *secundario o inducido*, nace una corriente de inducción.

Las tensiones primaria y secundaria son proporcionales a los números de vueltas de los respectivos devanados; luego el aparato puede transformar la tensión de la corriente primaria, dando una secundaria con mayor o menor tensión.

Los transformadores, cuyo primario se mantiene

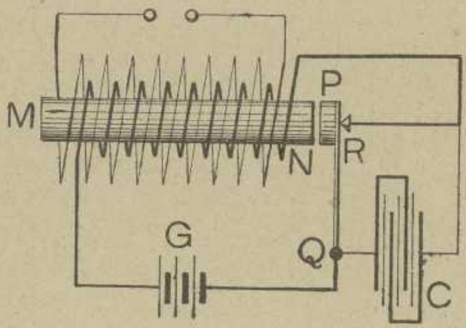


Fig. 39

con corriente de dirección variable (corriente alterna), son los transformadores industriales, a los cuales dedicamos en otro tomo toda la extensión que su importancia merece. Los transformadores cuyo primario se mantiene con corriente de intensidad variable (corriente intermitente), son los llamados carretes de Ruhmkorff, que tienen especial aplicación en electroterapia y telecomunicación sin hilos.

Carrete de Ruhmkorff. El carrete de Ruhmkorff. se representa esquemáticamente en la figura 39.

El núcleo *MN*, común de los dos devanados, se forma de un haz de alambres rectos, barnizados antes de reunirlos para que no se comuniquen unos con otros eléctricamente.

El devanado primario, dentro del secundario, está formado por unas cuantas vueltas de hilo de cobre grueso, y el secundario, exterior, se forma de gran número de vueltas de hilo fino.

El circuito primario se alimenta con un generador cualquiera *G*, que generalmente es una pila, y su corriente se hace intermitente mediante el interruptor *PR*, cuyo funcionamiento es el mismo que el de un timbre temblador. *P* es una pieza de hierro dulce fija al extremo de un muelle flexible *P2*. Mientras el núcleo *MN* no esté imantado, el muelle se apoya en el tope *R* y permite que la corriente circule por *RQG*. Pero en cuanto la corriente circula se imanta el núcleo, atrae la pieza *P* y se rompe el contacto *RP*. Quedando interrumpido el circuito y desimantado el núcleo, se restablece en seguida el contacto.

Estas atracciones y desprendimientos de la pieza *P* dan al muelle un movimiento vibratorio, y producen entre *R* y *P* las interrupciones necesarias para que la corriente primaria sea intermitente.

Cuando el circuito se interrumpe en *R* se produce siempre una chispa que oxida los contactos y llega a deteriorar el interruptor. Para evitarlo se deriva entre el muelle y el contacto un condensador *C*, que al abrirse el circuito absorbe la energía que debía producir la chispa, y al cerrarlo devuelve parte de la misma energía ayudando al efecto del generador *G*.

El circuito secundario termina generalmente en dos varillas metálicas, armadas de esferillas en sus puntas próximas, entre las cuales se produce la chispa durante el funcionamiento del aparato.

La figura 40 representa un modelo de carrete de Ruhmkorff.

Difiere de la disposición estudiada en el esquema anterior únicamente en algún detalle del interruptor temblador. En la figura 39 el contacto del interruptor *PR* tiene lugar entre dos sólidos. En la figura 40 el contacto se establece entre una punta

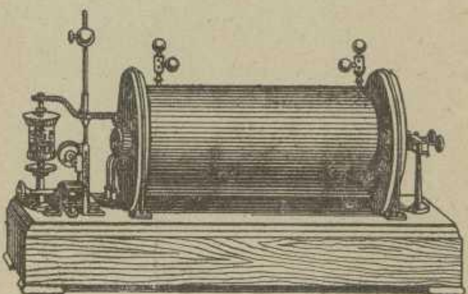


Fig. 40

metálica y el mercurio contenido en un recipiente que se ve a la izquierda del dibujo.

La capacidad, que pudiéramos llamar apagachispas, es un condensador de hojas de estaño contenido en la peana del aparato.

Los carretes Ruhmkorff se aprecian por la longitud de chispa que producen.

Corrientes de Foucault. Los fenómenos de inducción estudiados para conductores lineales, que forman circuitos cerrados, tienen lugar también en las masas metálicas, cualquiera que sea su forma.

Siempre que una masa metálica está atravesada por un flujo variable, se desarrollan en su seno corrientes inducidas que, en este caso particular, se llaman corrientes de Foucault.

La existencia de las corrientes de Foucault se prueba mediante un sencillo y concluyente experimento.

Entre los dos polos *MN* de un electroimán sin corriente (fig. 41) se suspende de un hilo una esfe-

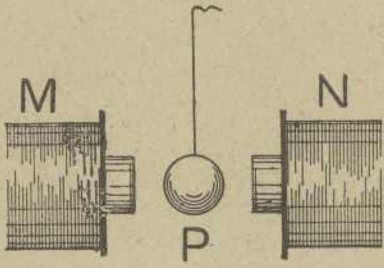


Fig. 41

rilla de cobre *P*, y retorciendo el hilo entre los dedos, la esferilla gira rápidamente en un sentido y en otro.

Cuando más veloz es el movimiento giratorio, se lanza la corriente al electroimán y se verá que la esferilla disminuye notablemente su velocidad y aun se detiene bruscamente si la corriente que anima al electroimán tiene intensidad suficiente. Esto es debido a que en la esferilla se desarrollan corrientes de Foucault, que en virtud de la ley de Lenz se oponen al movimiento.

En las máquinas eléctricas, donde hay piezas metálicas que se mueven en campos magnéticos o sometidas a flujos variables, deben evitarse cuidadosamente las corrientes de Foucault, que absorben buena parte de la energía y la transforman en calor inútil o perjudicial.

Algunas veces se provocan las corrientes de Foucault para utilizarlas como freno de piezas movibles. Esto sucede, por ejemplo, en el contador Thomson de energía eléctrica, en el cual el eje que acciona el contador de vueltas arrastra un disco de cobre entre los polos de imanes permanentes. Aproximando más o menos los polos magnéticos al disco de cobre se consigue que el giro sea más o menos lento.

Autoinducción de un carrete. Los fenómenos de inducción que tienen lugar entre dos circuitos diferentes, ocurren también entre las diversas espiras de un carrete, es decir, que *un carrete se induce a sí mismo*, y el fenómeno se llama *efecto de autoinducción o selfinducción.*

Es fácil darse cuenta de este efecto.

Cuando se lanza la corriente por un carrete, se produce un *flujo creciente* desde cero hasta el valor conocido (capítulo VII):

$$\mathbf{N} = \frac{4\pi m i \mu s}{l}$$

Este flujo creciente en el interior del carrete determina en él la aparición de una corriente inducida inversa que, según la ley de Lenz, se opone a la circulación de la corriente conducida.

Cuando el flujo alcanza su valor normal y se hace constante, cesa la corriente inducida y circula la conducida con su intensidad normal.

Al romper el circuito de un carrete, *el flujo decrece* de N a cero, y se produce una corriente de autoinducción, que cesa en cuanto el flujo se anula por completo.

Esta segunda corriente, según la ley de Lenz, se opondrá a la cesación de la corriente conducida.

Como se ve, los efectos de autoinducción o self-inducción son: *en el momento de cerrar el circuito dificultar el paso de la corriente, dando lugar a un* PERÍODO DE INTENSIDAD VARIABLE *hasta que se alcanza el* REGIMEN ESTABLE. *Cuando el circuito se abre, la autoinducción prolonga un instante la corriente, dando lugar a la extracorriente de ruptura.*

Coeficiente de autoinducción. Un carrete de m espiras produce un flujo

$$\mathrm{N} = \frac{4\pi m I \mu s}{l}$$

y llamaremos *coeficiente de autoinducción de cada una de las espiras a la relación entre el flujo que la atraviesa y la corriente que lo produce*

$$\mathrm{l} = \frac{\mathrm{N}}{I} = \frac{4\pi m \mu s}{l}$$

El coeficiente de autoinducción total del carrete, como conjunto de m espiras, será m veces mayor,

$$\mathrm{L} = m\mathrm{l} = \frac{4\pi m^2 \mu s}{l}$$

Esta expresión indica que la autoinducción de un carrete depende de las dimensiones de su núcleo (l, s), de su permeabilidad (μ) y del número de vueltas (m) de su devanado.

Es fácil ver que cuando se desee un carrete de gran coeficiente de autoinducción, se construirá con muchas vueltas de hilo y con núcleos muy permeables, muy anchos y muy cortos.

La unidad práctica aceptada para medir el efecto de autoinducción es el *henrio*.

Trabajo absorbido por una autoinducción. Un circuito recorrido por una corriente I, que corta un flujo N, hemos dicho que produce un trabajo (capítulo VII)

$$\mathbf{N}I$$

Pero en el caso de la autoinducción, durante el período variable que sigue al cierre del circuito, se dificulta el paso de la corriente; luego el trabajo debe ser absorbido y no producido. Podremos expresarlo por

$$-\mathbf{N}I = -lI \times I = -lI^2$$

Observemos que al cerrar el circuito, es decir, al iniciarse el período variable, la corriente es nula y, por tanto, el trabajo es también nulo. En cambio, al terminar el período variable, la corriente es I y el trabajo absorbido $-lI^2$.

Aceptemos para valor del trabajo absorbido durante el período variable, la media de los trabajos correspondientes a los momentos extremos, es decir, la media entre o y $-lI^2$. Tendremos, por tanto,

$$J = -l\frac{I^2}{2}$$

Si durante el período de cierre del circuito el trabajo es negativo, porque hay reducción de corriente, durante el período de apertura, que hay prolongación de corriente, el trabajo debe ser positivo, es decir, producido, y tendrá por expresión

$$J' = l\frac{I^2}{2}$$

Resulta así que *el trabajo absorbido por la autoinducción cuando la corriente se inicia, es devuelto por la misma autoinducción cuando la corriente cesa. Por tanto, la autoinducción no consume trabajo.*

Si la corriente de un circuito cesa, porque se corta bruscamente el conductor, se suprime el período variable de la corriente, y el trabajo que debía restituir en este período se manifiesta en forma de chispa. De donde se deduce que, *cuando se quiera evitar la producción de chispas, deberán anularse las corrientes en los circuitos, intercalando resistencias, pero de ningún modo cortando bruscamente los conductores.* Este es el fundamento de los *parachispas* empleados en radiotelegrafía.

Inducción mutua. Dos circuitos recorridos por intensidades I, I', se conducen mutuamente como dos imanes laminares, atrayéndose o repeliéndose, según los signos de las caras que tengan frente a frente.

La acción recíproca de los dos circuitos será proporcional a las intensidades que los animan y podremos escribir

$$\mathbf{G} = \mathbf{M}II'$$

Al factor **M** de proporcionalidad se le llama coeficiente de inducción mutua.

Entre el coeficiente de inducción mutua y los coeficientes de autoinducción de los dos circuitos existe la notable y sencilla relación siguiente:

$$\mathbf{M} = \sqrt{\mathbf{LL'}} \qquad \text{o} \qquad \mathbf{M}^2 = \mathbf{LL'}$$

o bien,

$$\frac{\mathbf{L}}{\mathbf{M}} = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{L'}}$$

es decir, que el *coeficiente de inducción mutua es medio proporcional entre los coeficientes de autoinducción de los circuitos que se influyen.*

FIN DEL TOMO I

ÍNDICE

Páginas

CAPÍTULO V. — *Condensadores.*

CAPÍTULO VI. — *Electrodinámica.*

Páginas

CAPÍTULO IX. — *Inducción y autoinducción.*

 ...RICIDAD Y MAGNETISMO