

ELECTRICIDAD MAGNETISMO



WWW.AUTOAPRENDIZAJE.INFO

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Su naturaleza y aplicaciones



Los fenómenos eléctricos son hoy familiares a todo el mundo gracias a la enorme difusión que han encontrado sus aplicaciones, tanto en el ambiente doméstico como en el laboratorio más especializado. Sin embargo, las causas de estos fenómenos, la naturaleza íntima de la electricidad, no son tan conocidas.

En este volumen se van a exponer los fundamentos del fenómeno electromagnético. Siempre que ha sido posible, se sigue el orden del proceso histórico de cómo el hombre ha descubierto y utilizado a lo largo del tiempo esta riqueza energética.

No se trata de un libro exclusivamente teórico, sino que, paralelamente a las explicaciones, se incluyen otros puntos más desconocidos y quizá tan importantes como aquéllas, tales como las biografías de los investigadores, las circunstancias más o menos anecdóticas que acompañaron al descubrimiento, aplicaciones de un fenómeno determinado a la vida cotidiana... También aparecen explicados aquellos conceptos matemáticos que en un momento dado puedan resultar indispensables en la exposición de un determinado punto o tema.

Finalmente se da una amplia visión de la Electricidad y el Magnetismo, que va desde los fenómenos más elementales de atracción electrostática hasta los métodos de obtención y aplicación de la corriente eléctrica. En los últimos capítulos se tratan las corrientes de alta frecuencia y las ondas electromagnéticas, así como sus aplicaciones técnicas.

Al final del libro aparecen unas indicaciones complementarias, en forma de apéndices, que pueden resultar útiles al lector, ya que amplían la teoría desarrollada en el texto. Entre ellas figuran algunos problemas típicos totalmente resueltos, así como un diccionario de términos y unas notas auxiliares.

INDICE

1

LA CARGA Y EL CAMPO ELECTROSTATICO

Campos eléctricos, 10
Cargas eléctricas, 13
Conservación de la carga, 14
Fuerza eléctrica. Ley de Coulomb, 16
Cuantificación de la carga eléctrica, 16
Estructura atómica de la materia, 17
Experimento de Millikan, 19

2

CARGAS Y LINEAS DE FUERZA

Representación de un campo eléctrico, 20
Cargas eléctricas extensas, 23
Carácter vectorial del campo eléctrico, 25
Condensadores, 25
Sistemas lineales. Principio de superposición, 26
Flujo de un vector, 27
Teorema de Gauss, 28
Principales magnitudes eléctricas.
Múltiplos y submúltiplos, 29

3

CORRIENTES ELECTRICAS

Cargas eléctricas en movimiento, 30
Densidad de corriente, 31
Intensidad de corriente, 34
Conducción metálica. Flujo de electrones, 36
Propiedades eléctricas de los materiales. Conductores y aisladores, 39

Informaciones complementarias:

La tormenta, 11
El ámbar, productor de electricidad, 12
Cargas positivas y negativas, 13

Fenómenos electrostáticos, 15
Así nació la fórmula de Coulomb, 16

El pararrayos, 18

Representación de líneas de fuerza, 22
El poder de las puntas, 24
Magnitudes escalares y vectoriales, 25

Notación exponencial, 26

Portadores de carga, 31
El vector densidad de corriente, 32
Origen de la corriente eléctrica.
Experimentos de Galvani y Volta, 33
Amperímetros, 35
¿Cómo se mueven los electrones en los metales?, 38

Otros modos de conducción eléctrica. Conducción no metálica, 40
 Transporte de cargas en el vacío, 41
 Conducción electrolítica, 43
 Conductividad y resistividad, 44
 Resistencia. Ley de Ohm, 45
 Superconductividad, 47
 Semiconductores, 48

4

CAMPOS MAGNETICOS

El descubrimiento del imán, 50
 Primeras aplicaciones del magnetismo: la brújula, 51
 Líneas de fuerza del campo magnético, 53
 Determinación experimental del campo magnético, 56
 Materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos, 57
 Temperatura de Curie, 58
 Intensidad del campo magnético, 59

5

**INTERACCIONES
ELECTRICIDAD-MAGNETISMO**

Influencia entre corrientes e imanes: experimento de Oersted, 62
 Campo magnético creado por un conductor, 66
 Campo creado por una espira, 68
 Solenoides, 69

Informaciones complementarias:

Cómo construir una pila eléctrica, 40
 El diodo, 41
 La electrólisis en los procesos fisiológicos, 42
 La sal, un formador de electrólitos, 43
 Diferencia de potencial y diferencia de altura, 45
 Medida de la resistencia: el óhmímetro, 46
 Voltio-amperio-ohmio, 47
 Polímetros, 48

Magnetismo y fisiología, 51

Los polos de la Tierra, 55

Superconductividad e imanes, 60

Un experimento similar al de Oersted, 63
 Ley de Ampère, 65

Flujo magnético. Descubrimiento de Faraday, 70

Experimento de Rowland, 75

Fundamento atómico de los fenómenos magnéticos. Explicación del ferromagnetismo, 77

6

CORRIENTE ALTERNA. IMPEDANCIA

Corrientes continuas, 80

Corrientes que varían con el tiempo, 83

Corrientes periódicas y aperiódicas, 83

Obtención de corrientes variables, 84

Corrientes alternas, 87

Alternadores, 88

Comportamiento de un circuito ante la corriente alterna, 89

Impedancia, 90

7

CORRIENTES DE MUY ALTA FRECUENCIA

La acción de condensadores y bobinas, 92

Circuitos oscilantes, 97

Corrientes de alta y baja frecuencia, 98

Radiación de energía electromagnética, 99

Experiencia de Hertz, 100

Antecedentes históricos, 101

Informaciones complementarias:

Fundamento de las máquinas eléctricas, 72

Circuitos magnéticos, 74

Electroimanes y relés, 76

Otras aplicaciones de las bobinas: timbre eléctrico, 78

Fusibles, 82

Notas sobre funciones trigonométricas, 86

Polarización, 90

Fugas del dieléctrico, 91

El transformador, 95

Selectividad, 97

El vector de Poynting, 102

Trenes de ondas, 103

Ondas hertzianas, 105

8

LA ENERGIA RADIANTE. LA LUZ

La energía electromagnética se propaga en el vacío, 106

Propagación de la energía radiante, 107

Características de las ondas electromagnéticas. Frecuencia y longitud de onda, 109

Espectro electromagnético, 110

Producción de ondas electromagnéticas. Osciladores, 113

Antenas, 115

Apéndice 1. Problemas, 117

Apéndice 2. Notas, 120

Apéndice 3. Biografías, 124

Apéndice 4. Diccionario de términos, 127

Informaciones complementarias:

La transmisión de las ondas hertzianas, 107

Fotosíntesis, 108

Difracción, 110

Tipos más comunes de radiación electromagnética, 112

Cristal de cuarzo, 113

La primera emisora de radio, 114

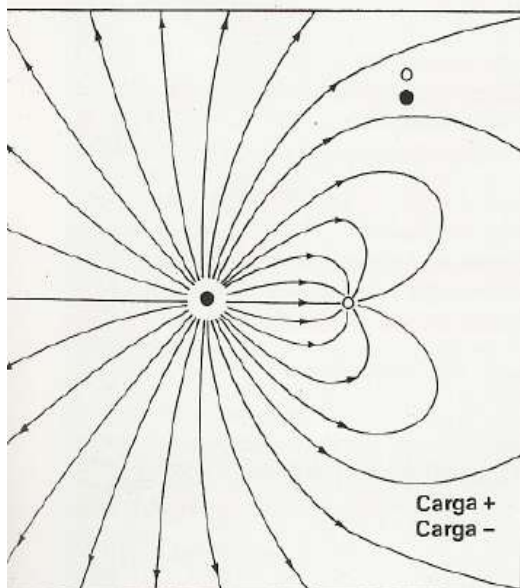
La antena, 115

Historia de la radio. Primeras investigaciones, 116



LA CARGA Y EL CAMPO ELECTROSTATICO

Campos eléctricos



En Física, los campos de fuerzas se representan mediante «líneas de fuerza». En esta figura se aprecia la orientación de las líneas de fuerza en un campo eléctrico producido por dos cargas de distinto signo.

En el lenguaje físico es muy frecuente el uso del término **campo**. En su significado más amplio, un **campo** es una **región de espacio donde actúa un agente físico determinado**. Si este agente físico es una fuerza como la debida a la gravedad, hablaremos de un campo gravitatorio. Si se trata del magnetismo, diremos que se trata de un campo magnético. Dicho en otras palabras: un campo es una región de espacio donde ocurre «algo especial», producido por un agente físico determinado.

Pueden existir diversas clases de campos, tantos como clases de agentes físicos que lo determinen.

Un imán es el agente físico que produce la aparición de un campo magnético. Unas cargas eléctricas son el agente físico que determina la existencia de un campo eléctrico. Una masa es el agente determinante de la presencia de un campo gravitatorio, etc.

En general, si en una región de espacio actúa una determinada fuerza, hablaremos de un **campo de fuerza**. Este concepto abstracto de «campo de fuerzas», donde no se especifica la naturaleza de dichas fuerzas, es muy útil para los físicos teóricos y para los matemáticos, que pueden elaborar y manejar conceptos y propiedades matemáticas generales, aplicables a cualquier tipo de campo en particular.

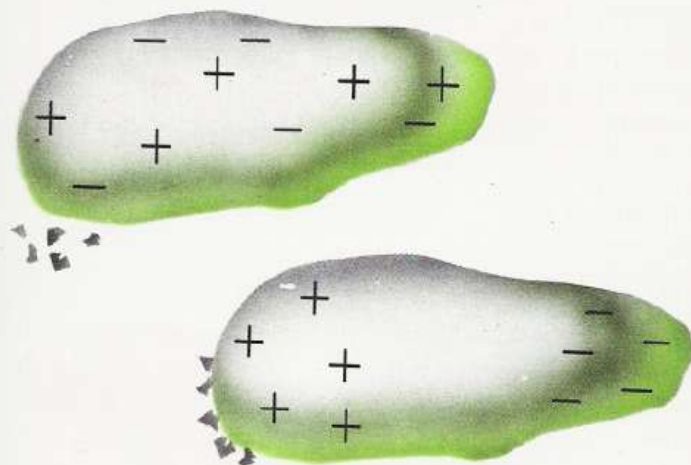
Quizá uno de los primeros fenómenos que observaron los antiguos físicos fue el de la electricidad estática en su más impresionante demostración natural.

La primera observación experimental, cuya fecha no es conocida exactamente, pero que se remonta a la Grecia clásica, se realizó con el ámbar. Los

antiguos griegos frotaban un trozo de ámbar con un paño de lana y veían que el ámbar, después de frotado, atraía cuerpos ligeros, hilos, trocitos de madera, etc., que se quedaban pegados al trozo de ámbar. Al frotar el ámbar se creaba, pues, un **campo eléctrico**, que era la región de espacio donde el ámbar dejaba sentir su acción atractiva.

El análisis y la posible explicación de este fenómeno eléctrico se presta con más facilidad al uso del concepto de campo que en el caso de un fenómeno gravitatorio, por ejemplo, ya que en él el experimentador no puede eliminar o crear a su voluntad la fuerza gravitatoria, mientras que un campo eléctrico lo puede crear y destruir a su antojo.

Si observamos la figura, veremos que el ámbar, antes de ser frotado, no realiza ninguna acción atractiva sobre las partículas ligeras que aparecen sueltas y dispersas.



Al frotar el trozo de ámbar, las partículas, que antes estaban sueltas, quedan ahora pegadas a uno de los extremos del trozo de ámbar, dando la impresión de que de él surge una fuerza atractiva. La misma experiencia se puede realizar con el otro extremo del trozo de ámbar.

Estamos, pues, ante la creación de un campo eléctrico. El frotamiento del trozo de ámbar ha puesto de manifiesto un campo que anteriormente no existía. ¿Qué ha pasado?

Desde luego, lo que haya sucedido solamente ha podido ser en el interior del sistema ámbar-paño. El resto del espacio que lo rodea no ha sufrido ningún cambio.

LA TORMENTA

Podemos imaginar fácilmente el estupor y el asombro de los hombres primitivos ante un fenómeno natural tan impresionante como es el rayo. Durante mucho tiempo se creyó que el rayo, al igual que otras muchas manifestaciones de la Naturaleza, era únicamente expresión de la Divinidad. Hasta el siglo XVIII no existió el estado mental apropiado para considerar esta manifestación natural como un fenómeno de la misma esencia que los otros fenómenos experimentales de tipo eléctrico. El rayo, cuya génesis y desarrollo se pueden reproducir perfectamente en el laboratorio, es de tipo electrostático. Se debe a la acumulación de cargas eléctricas en las nubes, hasta determinar campos eléctricos tan poderosos que ocasionan el equilibrio de «excesos de carga» mediante una descarga instantánea o chispa, que va acompañada de ruidos muy intensos y de brillos muy luminosos. La formación de la chispa depende de la disposición de las cargas entre nube y nube o entre nube y tierra.



EL AMBAR, PRODUCTOR DE ELECTRICIDAD

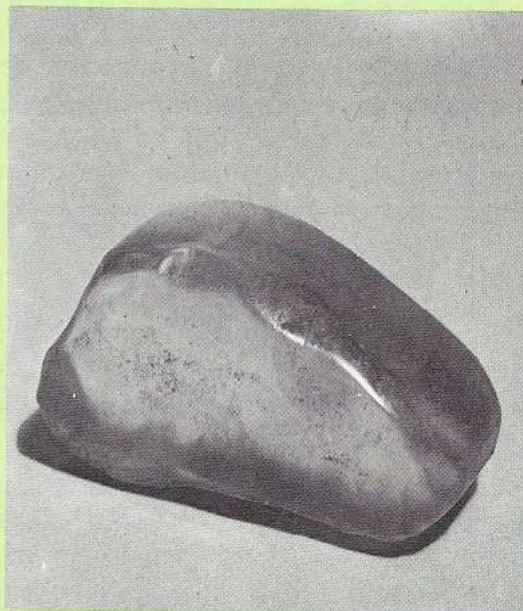
El ámbar es una resina de un árbol determinado que ha quedado fosilizada. Su origen es, pues, conocido desde la antigüedad. En la actualidad no es un producto muy abundante, pero el fenómeno de electrización por frotamiento se puede realizar con muchas otras sustancias y objetos. Por ejemplo, con un peine, o con un bolígrafo de plástico frotándolo contra la manga del jersey se puede observar cómo atrae pequeños papelitos.

Precisamente el nombre griego del ámbar, «*élektron*», es el que ha servido, genéricamente, para designar a todos los fenómenos derivados de estas primitivas observaciones, que hoy conocemos como Electricidad.

En realidad, el fenómeno de electrización por frotamiento, o de creación de campos eléctricos por frotamiento, se aprecia en los dos cuerpos que se frotan. En nuestro caso, tanto el ámbar como el paño sufren la aparición de unas propiedades eléctricas, pero el fenómeno es mucho más perceptible en el ámbar que en el paño, ya que el paño, por presentar una gran superficie en contacto con el aire, y por tener unas características higroscópicas notables, pierde sus propiedades eléctricas en muy poco tiempo.

El sistema formado por el ámbar y el paño constituye un sistema aislado (o sea, que no intercambia materia con el exterior), y mediante el frotamiento ocurre una transferencia de cargas del paño al ámbar y viceversa, además de una redistribución de dichas cargas en el interior de cada cuerpo.

Después de frotado con un paño, el ámbar queda cargado eléctricamente, lo que se pone de manifiesto por la propiedad de atraer pequeños trozos de papel.



Ambar.



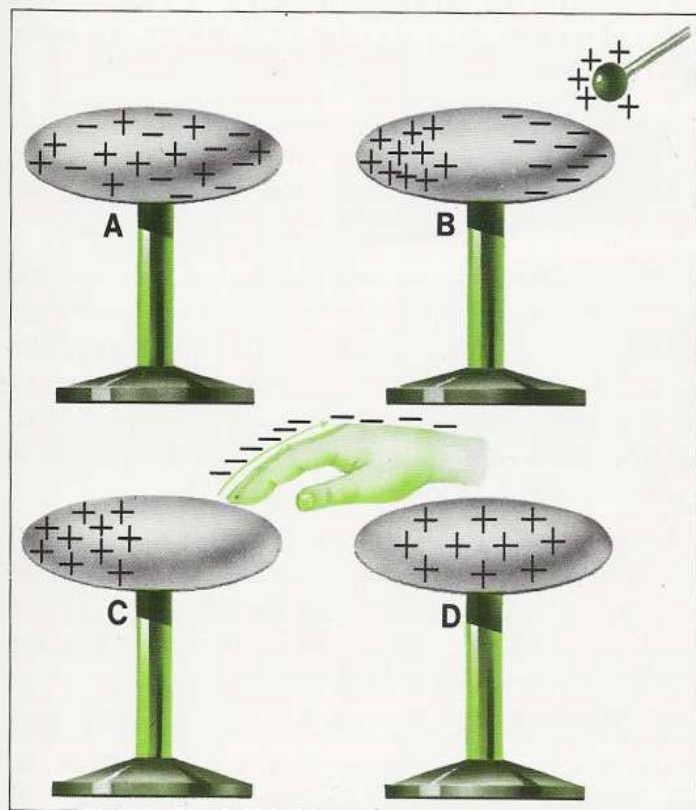
Cargas eléctricas

En la definición rigurosa de cargas eléctricas intervienen conceptos propios de la teoría atómica. No obstante, para nuestros fines podemos conformarnos con un concepto mucho más simple.

En la Naturaleza, la carga eléctrica es algo inherente a la materia e inseparable de ella. Dondequiera que exista materia existe carga eléctrica. Sin embargo, no toda la materia manifiesta fenómenos de tipo eléctrico. ¿Por qué?

Existen dos tipos o clases de carga eléctrica. Convencionalmente, y desde épocas muy antiguas, se las ha llamado **positivas** y **negativas**.

En su estado natural (como el ámbar antes de ser frotado) las cargas positivas y negativas aparecen entremezcladas y cualquier región de materia que consideremos contendrá tantas cargas positivas como negativas. Al perturbar de alguna manera el material (mediante el frotamiento, en nuestro ejemplo), lo que hemos hecho ha sido separar las cargas eléctricas que antes estaban juntas y entremezcladas.



CARGAS POSITIVAS Y NEGATIVAS

No resulta nada afortunada la elección de los nombres de positiva y negativa que atribuimos a las cargas eléctricas. No hay nada positivo ni negativo que podamos atribuir a dichas cargas. Debemos más bien considerarlas como dos aspectos distintos y complementarios de una misma cosa, algo así como ocurre con la mano derecha y la mano izquierda.

Electrización por influencia:

- A. El material tiene cargas + y - por igual; está en estado neutro.
- B. Se aproxima a un extremo otro material cargado positivamente. Las cargas positivas y negativas se separan.
- C. Al tocar en un extremo con un conductor (la mano conectada a tierra) emigran las cargas de ese extremo.
- D. Al desaparecer las cargas de un signo, sólo quedan las del signo contrario. El material queda cargado.



Benjamin Franklin, famoso político de los Estados Unidos que experimentó con una cometa las propiedades del rayo.

Evidentemente, la cuerda que empleó era de un material no conductor, ya que, de no haber sido así, probablemente no hubiera llegado a desempeñar el cargo de embajador de los Estados Unidos en Francia.

La materia, en su estado natural, no presenta campos eléctricos, ya que sus cargas están entremezcladas y revueltas. Este estado natural se denomina **estado neutro**, de equilibrio o de no excitación.

Al separarse entre sí las cargas eléctricas aparece el campo eléctrico, y si las cargas eléctricas se vuelven a juntar desaparece dicho campo.

El fenómeno, en esencia, es tan simple como hemos descrito. No ocurre nada más que lo dicho, pero merece la pena que estudiemos más de cerca lo que ocurre con el número total de cargas eléctricas.

CONSERVACION DE LA CARGA

En su estado neutro, la materia tiene el mismo número de cargas eléctricas positivas y negativas. Al ser excitada, la materia (nuestro trozo de ámbar, por ejemplo) sigue teniendo el mismo número de cargas (en Física se conoce esta propiedad como **conservación de la carga** en sistemas aislados, es decir, los que no interactúan con otros sistemas).

En nuestro caso el sistema comprende el trozo de ámbar y el paño con el que se ha frotado. Aunque las cargas se hayan repartido entre el ámbar y el paño, el número total de ellas es el mismo que antes de frotar.

Quede, por tanto, claro que lo que interviene de manera más determinante en la creación de un campo eléctrico es la **disposición** de las cargas eléctricas que lo determinan.

La carga eléctrica es una propiedad fundamental de las partículas elementales que constituyen la materia. Las fuerzas eléctricas que mantienen unidas a las cargas de las partículas elementales no se observan **macroscópicamente**, o sea, desde fuera, sino que se quedan reducidas en el interior de la materia a escala **microscópica**.

Desde el punto de vista macroscópico, que es el que a nosotros nos interesa, cuando hablamos de carga eléctrica nos referimos a carga neta no neutralizada, esto es, la carga de un signo cualquiera que existe en exceso sobre la del otro signo.

A esta carga macroscópica, responsable de la aparición de campos eléctricos macroscópicos, se la llama carga del cuerpo y se designa por la letra q .

FENOMENOS ELECTROSTATICOS

Los fenómenos electrostáticos no son solamente curiosidades de laboratorio. Están presentes en nuestra vida cotidiana y desempeñan un papel importante en gran cantidad de procesos.

Por ejemplo, al quitarnos un jersey de lana (sobre todo si debajo llevamos camisa de fibras sintéticas) se perciben unos ligeros chispazos debidos al rozamiento mutuo entre el jersey y la camisa.

Al caminar sobre una moqueta de material plástico, llevando calzado de goma, nuestro cuerpo adquiere una carga electrostática, que podemos percibir inmediatamente (y desagradablemente algunas veces) al tocar un objeto metálico, como el marco de una ventana o un radiador de calefacción.

Algunas veces no podemos peinarnos con facilidad porque el pelo está muy seco y se electriza al pasar el peine. La solución inmediata es añadir agua al sistema, con lo

cual el cabello se vuelve parcialmente conductor y las cargas eléctricas dejan de acumularse sobre él.

Cuando un automóvil circula sobre una calzada muy seca, su chasis metálico puede quedar cargado electrostáticamente, según podemos percibir al tocar el tirador de la puerta. Esta es la razón de que algunos coches lleven colgando una cadenita metálica o un alambre, para permitir que las cargas eléctricas acumuladas se descarguen a tierra.

Finalmente, las prendas fabricadas con unas determinadas fibras sintéticas suelen ser irritantes e incómodas para la piel. Los fabricantes de detergentes suministran al comercio unos productos llamados «suavizantes» que no son otra cosa que sustancias antiestáticas que eliminan las cargas electrostáticas del tejido.

Dispositivo de descarga electrostática de un automóvil.



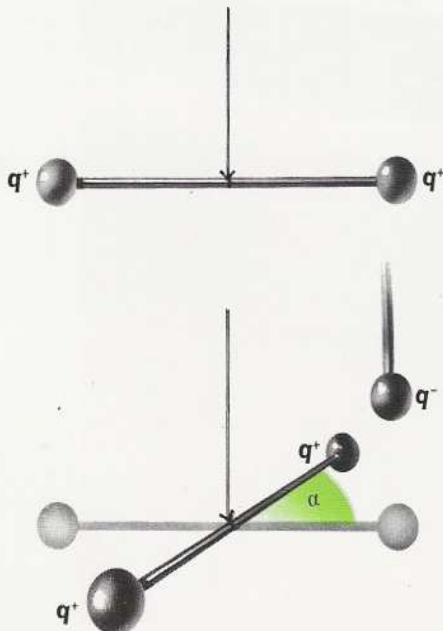
ASI NACIO LA FORMULA DE COULOMB

Coulomb obtuvo su fórmula de manera experimental. Para ello utilizó el péndulo de torsión, que anteriormente había sido empleado por Cavendish para demostrar la validez de la ley de atracción universal de Newton (que, como se puede apreciar, guarda una notable analogía con la propia expresión de Coulomb, con sólo sustituir en ella masas por cargas eléctricas).

El péndulo de torsión consta de una barra en cuyos extremos existen dos masas iguales, y está suspendido de un hilo vertical por su centro de gravedad.

Cualquier fuerza, atractiva o repulsiva, que se ejerza sobre las dos masas hará que la barra que las une gire un cierto ángulo, retorciendo el hilo de suspensión y alejándose de su posición de equilibrio. La determinación del ángulo α permite conocer la magnitud de la fuerza aplicada.

La balanza de torsión, inventada por Cavendish, es un instrumento muy delicado y sensible, y con ella se pueden medir fuerzas muy pequeñas.



Fuerza eléctrica. Ley de Coulomb

Al finalizar el siglo XVIII, los científicos dispusieron de los medios experimentales, de la paciencia y de la curiosidad necesarios para realizar observaciones exactas y detalladas de las fuerzas procedentes de los campos creados por las cargas eléctricas.

El resumen de estas observaciones experimentales se puede expresar mediante tres enunciados fundamentales:

1. **Existen dos, y sólo dos, clases de carga eléctrica: positiva y negativa.**
2. **Dos cargas muy pequeñas (como un punto, o cargas puntuales) ejercen entre sí fuerzas que se dirigen de una a otra por el camino más corto, por la línea recta que las une. Dichas fuerzas son directamente proporcionales al producto de las cargas (cuanto mayores sean las cargas, más grande será la fuerza), e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia entre las cargas (cuanto más lejos esté una de la otra, mucho más débil será la fuerza).**
3. **Estas fuerzas son atractivas para las cargas de distinto nombre (positivas y negativas) y repulsivas para las cargas iguales, o del mismo nombre (positiva y positiva o negativa y negativa).**

Según estos resultados experimentales, la expresión matemática que refleja la relación entre fuerza, cargas y distancia entre ellas es la **ley de Coulomb** (ver Apéndice 2, nota 1), que se expresa así:

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

CUANTIFICACION DE LA CARGA ELECTRICA

De la expresión de la ley de Coulomb deducimos que cuanto mayor sea la magnitud de una o de las dos cargas, más grande será la fuerza que actúe entre ellas. Pero ¿cómo se determina la cantidad de carga eléctrica?

Al estar la carga eléctrica incluida en el interior de la materia, no podemos medir dicha carga mediante las dimensiones físicas del material en el que se encuentra. La medición de la carga eléctrica se hace indirectamente, determinando la fuerza que ejerce sobre otra carga eléctrica conocida, es decir, por aplicación directa de la ley de Coulomb.

Nos resulta ya muy conveniente estudiar con un poco de detalle lo que ocurre con la constitución atómica de la materia.

Estructura atómica de la materia

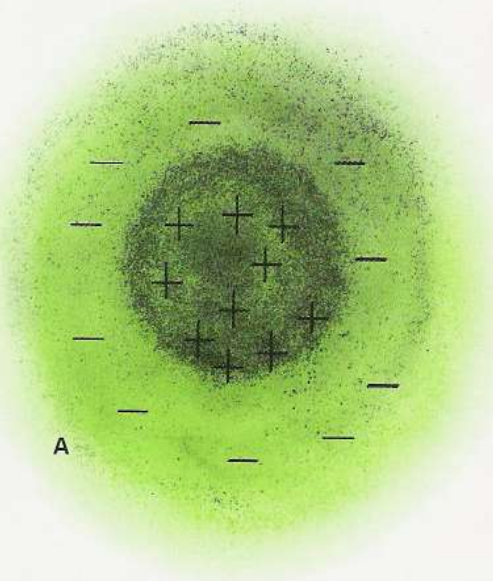
La naturaleza atómica de la materia es de tipo discreto. En Física se distinguen dos conceptos: **discreto** y **continuo**. Estos dos conceptos son opuestos entre sí. Decimos que algo es continuo cuando podemos descomponer ese algo en trocitos cada vez más pequeños, y cada trocito seguirá siendo reconocible como el algo original, independientemente de su pequeñez.

La materia no es continua, sino discreta o discontinua. Si vamos dividiendo sucesivamente un trozo de materia en trocitos cada vez más pequeños, llegaremos a un límite a partir del cual ya no podremos seguir dividiendo más. Y es que la materia está formada por unos pequeños granitos, llamados **átomos**.

Se han emitido gran cantidad de teorías en cuanto a la constitución interna del átomo que difieren ampliamente unas de otras, pero que, en lo referente a los fenómenos que se van a tratar aquí, todas concuerdan en que un átomo está formado por un núcleo, donde se encuentran las cargas eléctricas positivas, y una corteza, donde se mueven las cargas negativas.

En realidad, estas cargas eléctricas no son cargas puras, sino que están colocadas sobre un soporte material. Resulta más apropiado hablar de partículas cargadas. Por eso, en A hemos representado un modelo eléctrico de átomo, con las cargas eléctricas distribuidas así: las positivas en el centro (núcleo) y las negativas en el exterior (corteza).

Representación del átomo con las cargas eléctricas positivas en el núcleo y las negativas en la corteza.



EL PARARRAYOS

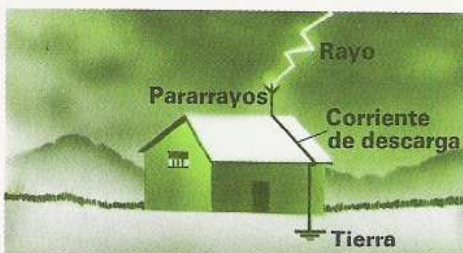
Uno de los fenómenos eléctricos naturales que más puede afectar al hombre es el rayo. Es lógico que su amenaza sea temida por todos, ya que los destrozos que puede ocasionar un rayo son imprevisibles.

La chispa eléctrica tiene una mayor tendencia a caer en los conductores afilados y puntiagudos, donde la acumulación de cargas superficiales es muy grande.

Basándose en este **poder de las puntas** se construyen los pararrayos, que se colocan en la parte superior de los edificios y que consisten en una varilla metálica que termina en una o varias puntas muy afiladas.

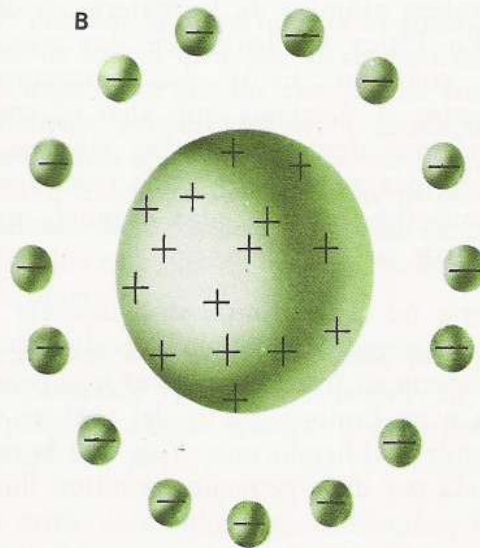


La varilla metálica está unida a tierra mediante un cable de gran sección, para permitir el paso de corrientes eléctricas de gran intensidad.



Cuando se produce la descarga eléctrica originada por el rayo, la corriente recogida por el pararrayos pasa por el cable y se dirige a tierra. Al tener el cable una resistencia eléctrica muy pequeña, la corriente «prefiere» circular por él antes que recorrer un camino más largo (a través de tejados, paredes, tabiques, etc.) y peligroso para los habitantes.

En B representamos el mismo átomo, pero ponemos de relieve que las partículas cargadas son algo concreto y definido, con límites precisos. Representamos de distinta forma las diferentes clases de carga: dentro las positivas y fuera las negativas. Además, como estamos tratando de partículas, es importante señalar su tamaño y su peso (o, mejor dicho, su masa). Es muy importante tener en cuenta que los modelos gráficos suelen ser representaciones aproximadas y poco precisas de la realidad. De la observación de las figuras no se debe llegar a la conclusión de que las partículas atómicas tienen la forma o el color representados, sino de que en la realidad deben ser algo parecidas a lo que representamos en las figuras. Debemos quedarnos con la esencia, no con la forma de la figura.



En cada átomo debe existir un estado de equilibrio eléctrico, es decir, deben existir tantas cargas positivas (**protones**) como negativas (**electrones**).

En un trozo de materia, tal como el ámbar de nuestro ejemplo original, existirá equilibrio eléctrico entre el número total de cargas eléctricas positivas y negativas, y dicho equilibrio se conservará tanto antes como después de haberlo frotado. Lo que ha ocurrido es que las cargas, al frotarlo, han cambiado de sitio.

Pero, ¿la magnitud de la carga eléctrica dependerá nada más del tamaño del material? Es decir, ¿se cumple que cuanto mayor sea el número de átomos mayor será la carga? En principio sí, pero también

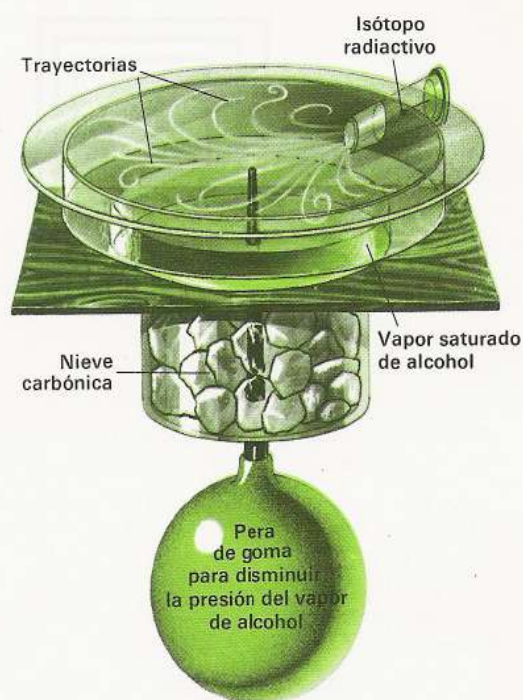
influye la clase de material (la clase de átomos que lo constituyen). Unos átomos son más grandes (tienen más cargas) que otros y dichas cargas pueden moverse con más facilidad de un átomo a otro que en otras clases de átomos. Precisamente por eso, se distinguen dos grandes grupos de materiales, llamados **conductores** y **aisladores**, de los que volveremos a hablar con más detenimiento en páginas posteriores.

Desde el punto de vista teórico, parece muy claro que la cantidad más pequeña de carga eléctrica que existe en la materia es la de la más pequeña de las partículas cargadas, es decir, el electrón.

EXPERIMENTO DE MILLIKAN

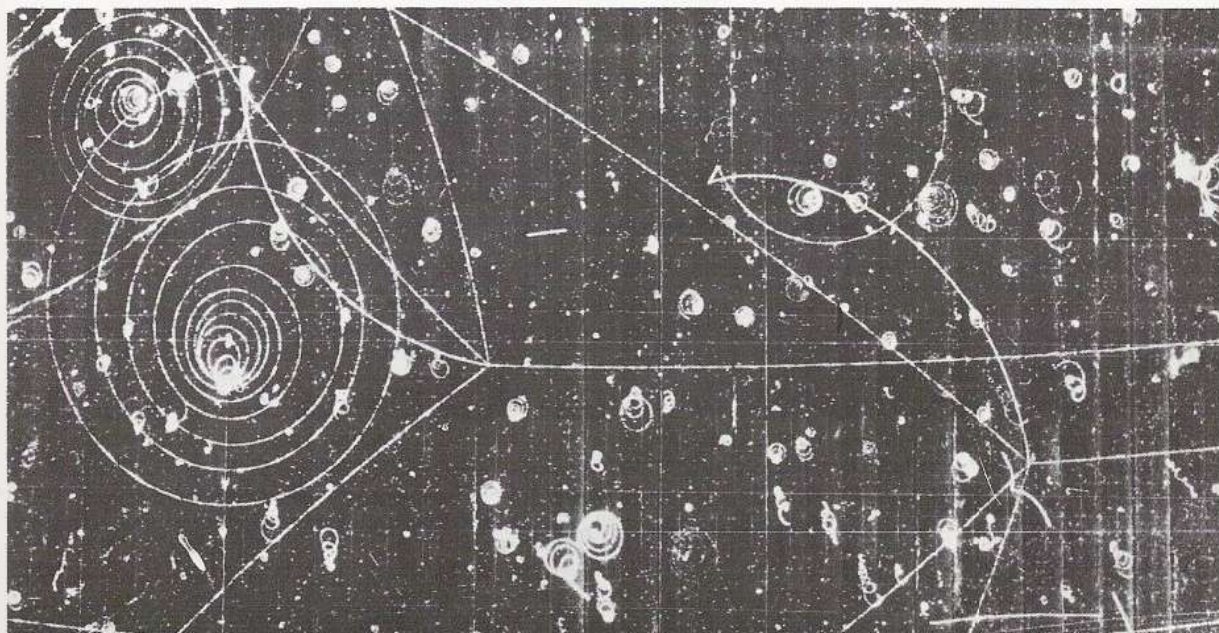
La determinación de la magnitud de una carga eléctrica solamente se puede hacer por el método indirecto de determinar la fuerza que ejerce sobre otra carga eléctrica conocida.

Un hábil experimentador, llamado Millikan, consiguió demostrar que, en efecto, **la carga eléctrica es siempre un múltiplo de una cantidad muy pequeña, indivisible, que es la carga eléctrica correspondiente al electrón**, y que se designa por e^- . De modo que la carga eléctrica está **cuantificada** (sólo existe en cantidades enteras, no fraccionarias, de e^-). (Ver Apéndice 2, nota 2.)



Cámara de niebla. En este dispositivo se pueden observar las trayectorias de partículas subatómicas. En un aparato similar a éste fue donde Millikan realizó la medida de la carga del electrón.

Fotografía de las trayectorias de partículas en una cámara de niebla.





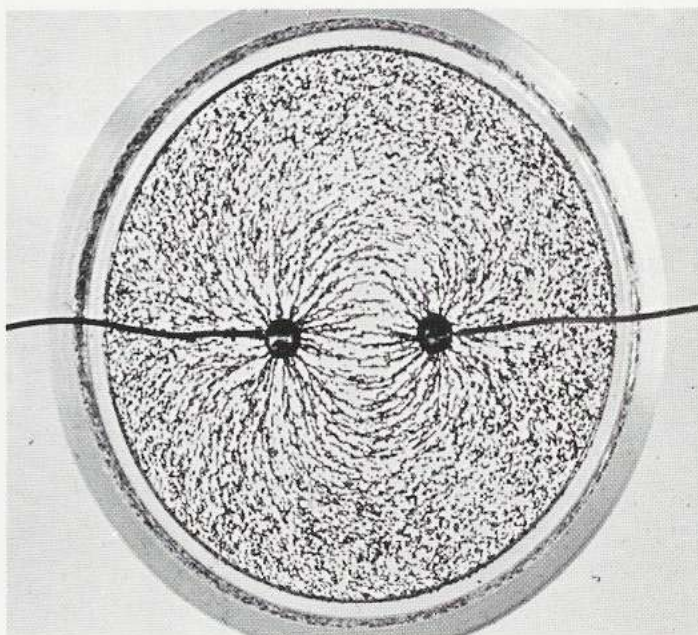
CARGAS Y LINEAS DE FUERZA

Representación de un campo eléctrico

Como acabamos de indicar, la carga eléctrica está cuantificada, es decir, la Naturaleza la «despacha» únicamente en múltiplos de una cantidad elemental. No obstante, en la vida real las cargas con las que tratamos son mucho mayores que dichas unidades elementales. Podemos medirlas y determinarlas, en base a la ley de Coulomb, determinando el campo eléctrico que producen.

El campo eléctrico está indisolublemente ligado a la presencia de cargas eléctricas. Si conocemos el campo, podremos precisar el comportamiento de las cargas que se encuentren sometidas a su influencia.

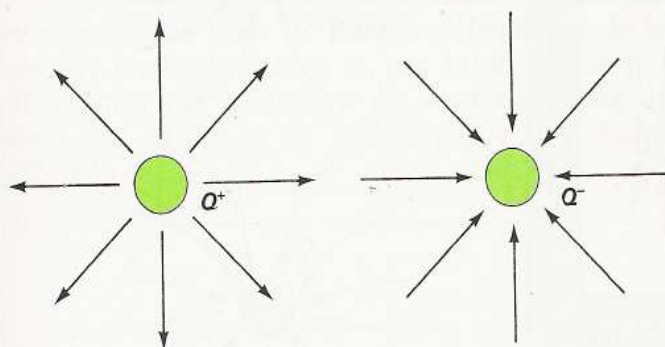
Las partículas de pequeño tamaño sumergidas en un medio viscoso, se orientan al aplicar un campo eléctrico y nos dan una idea de su estructura geométrica. Una partícula se coloca a continuación de otra, y determinan las líneas de fuerza.



Para poder estudiar las propiedades del campo eléctrico nos resulta muy útil poderlas expresar gráficamente, y esta representación se realiza mediante las **líneas de fuerza**.

El concepto de línea de fuerza es de tipo intuitivo. Si representamos una carga Q por un punto, definimos, convencionalmente, que **las líneas de fuerza entran en las cargas negativas y salen de las cargas positivas**.

La carga Q^+ de la figura es una carga positiva. De ella salen o nacen las líneas de fuerza.

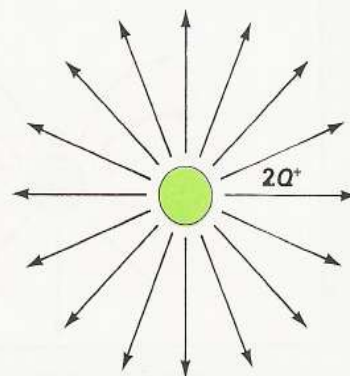
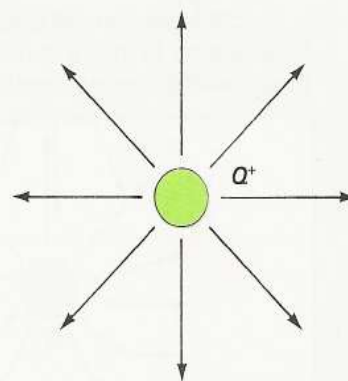


Análogamente, la carga Q^- de la figura, que es una carga negativa, recibe las líneas de fuerza que van a desaparecer en ella.

Cuanto mayor sea la carga Q (independientemente de su signo), más líneas de fuerza saldrán o entrarán en ella. Dicho en otras palabras, cuanto más numerosas sean las líneas de fuerza, mayor será el campo eléctrico.

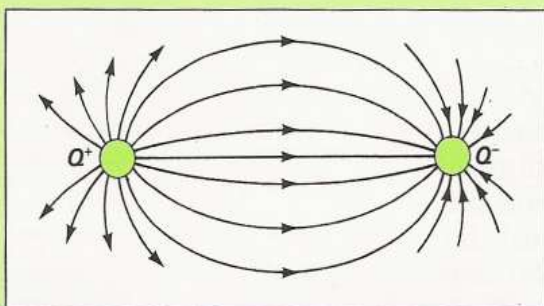
Si las cargas son muy pequeñas (como si se tratase de puntos), las llamaremos **cargas puntuales**. En ese caso las líneas de fuerza son como los infinitos radios de una esfera en cuyo centro se encuentra la carga puntual. Hay que tener en cuenta que la carga está situada en el espacio tridimensional normal y que nuestra representación gráfica está limitada irremediablemente a dos dimensiones. Lo que en el papel se ve como un círculo, no es más que la sección de una esfera.

Así, pues, si tenemos dos cargas, una de doble magnitud que la otra, la primera tendrá doble número de líneas de fuerza que la segunda, es decir, su campo será el doble que el de ésta.



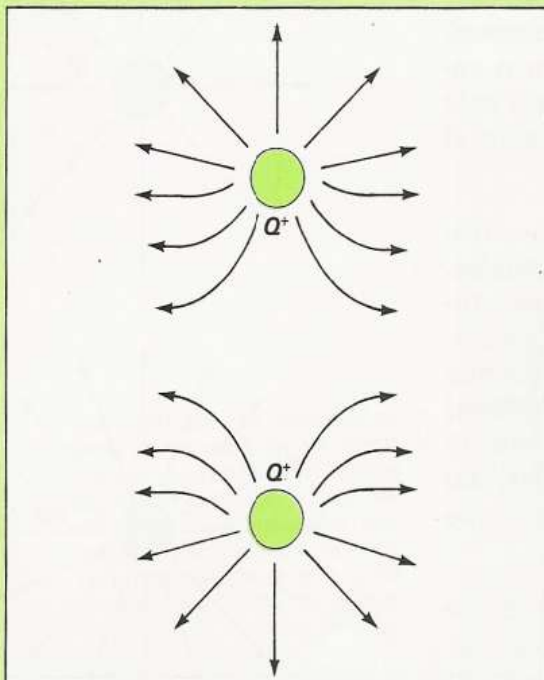
REPRESENTACION DE LINEAS DE FUERZA

Las líneas de fuerza solamente serán rectas en el caso de cargas aisladas, o sea, de cargas muy separadas de otras cargas. ¿Qué ocurre si dos cargas puntuales de signo contrario están próximas entre sí? En ese caso las líneas de fuerza que salen de la carga positiva van a parar a la carga negativa.

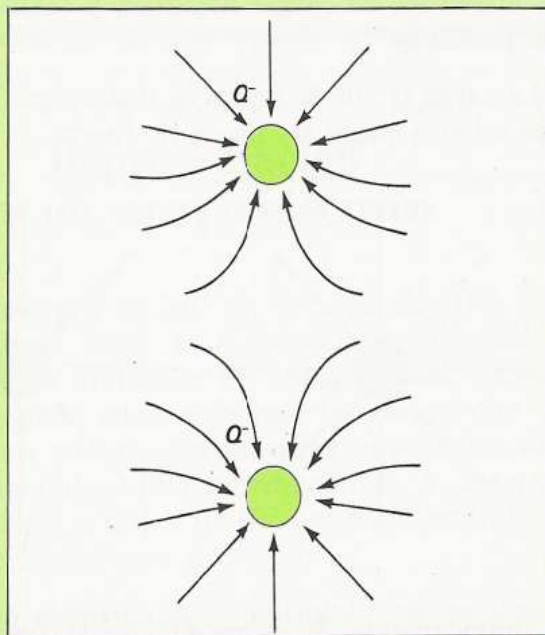


Nuestra representación es plana. En realidad la figura tendría simetría de rotación alrededor del eje que une las cargas.

Si considerásemos ahora dos cargas de igual signo, la representación sería, para el caso de dos cargas positivas:

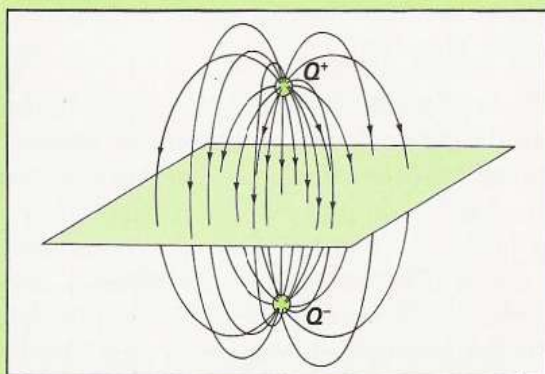


Y dos cargas negativas se representarían así:



Hay que tener en cuenta, también, que las líneas de fuerza del campo eléctrico son tridimensionales, lo cual no es fácil de representar en un papel.

En realidad, el campo eléctrico creado por dos cargas Q^+ y Q^- sería así:

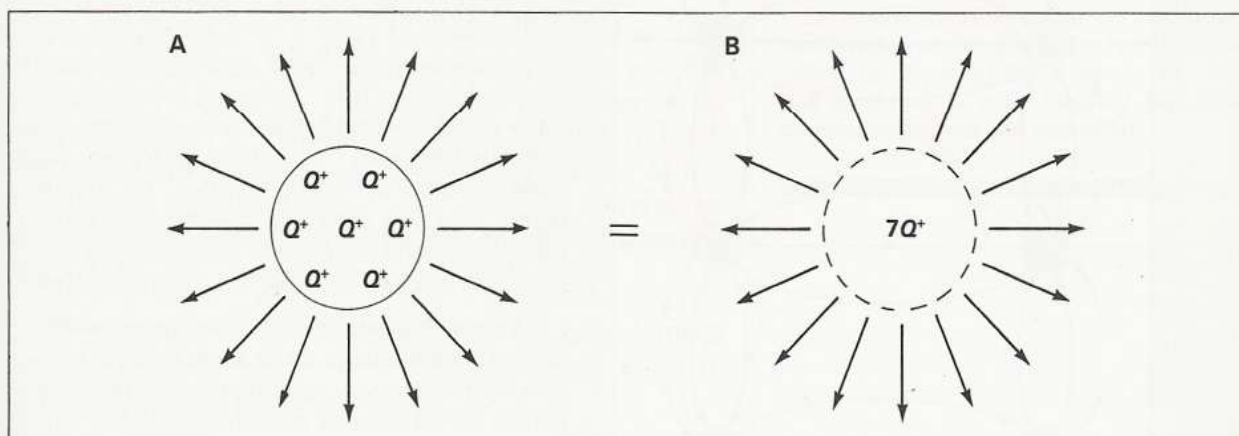


Las líneas de fuerza del campo eléctrico nos explican sus propiedades y nos permiten adivinar cuál será el comportamiento de una carga cuando esté sometida a dicho campo. (Ver Apéndice 2, nota 3.)

Cargas eléctricas extensas

Si las cargas están situadas sobre un cuerpo de dimensiones grandes, ya no podemos considerar a dichas cargas como correspondientes a puntos (cargas puntuales), sino que se trata de **cargas extensas**. Cuando la carga está distribuida sobre un objeto de forma esférica, las líneas de fuerza son perpendiculares a la superficie esférica en todo punto, es decir, siguen la dirección de los radios de la esfera. Para todos los efectos, es lo mismo considerar una esfera cargada que una carga puntual que tenga la misma carga que la esfera, ya que, dibujando con una línea de puntos el contorno de la esfera, las líneas de fuerza (y, por tanto, el campo) en el exterior del perímetro de la esfera (línea de puntos) son idénticas en ambos casos (ver Apéndice 2, nota 4).

El campo eléctrico producido por una esfera cargada es el mismo que el producido por una carga puntual equivalente situada en su centro.



Las cargas eléctricas se miden en unidades prácticas que son mucho mayores que la unidad natural. La unidad natural de carga, es decir, la carga eléctrica más pequeña que existe, es el electrón.

Las cargas eléctricas que manejamos en la realidad están formadas por cantidades enormemente grandes de electrones. Si empleásemos el electrón como unidad de carga, tendríamos que utilizar números excesivamente grandes.

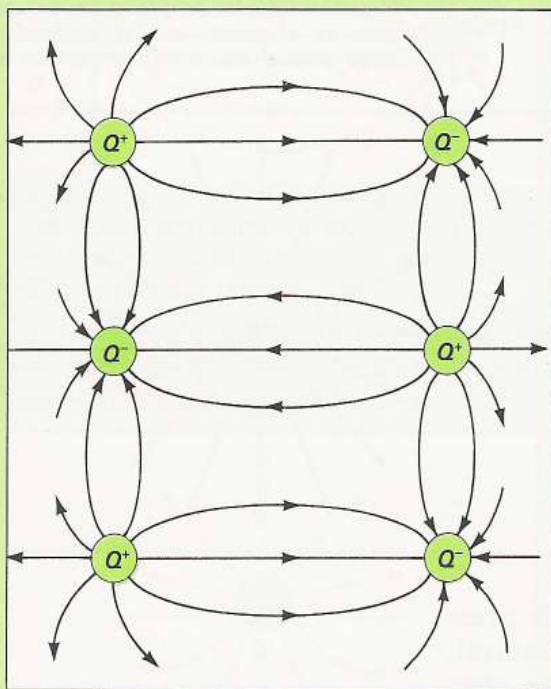
En la práctica, la carga se mide en **culombios** y su equivalencia con el electrón es la siguiente:

$$1 \text{ culombio} = 6,2 \text{ trillones de electrones}$$

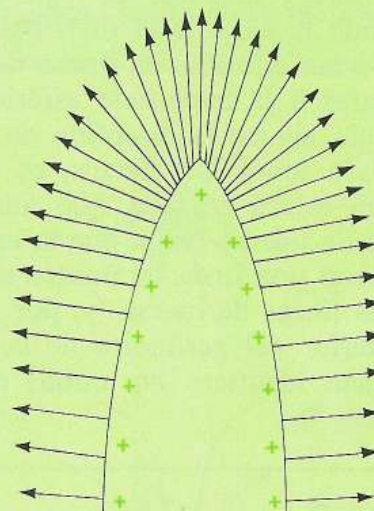
EL PODER DE LAS PUNTAS

Las líneas de fuerza expresan la forma de un campo de una manera muy clara e intuitiva, mucho más que la ecuación matemática equivalente. Siempre es más fácil observar una figura que interpretar una fórmula.

Las líneas de fuerza pueden adoptar formas muy variadas, tanto como las distribuciones de cargas que las producen. En el caso de varias cargas, positivas o negativas, el campo tendrá la siguiente configuración:



Vamos a imaginarnos una distribución superficial de cargas colocadas sobre un cuerpo de forma puntiaguda. El campo, en la zona cercana a la superficie, vendrá expresado por las líneas de fuerza, que estarán más apretadas en las zonas donde existe mayor densidad superficial de carga. Y ello ocurrirá así porque las cargas del mismo nombre se repelen entre sí, y las que disponen de sitio suficiente se separan lo más posible (es decir, determinan una densidad superficial de carga lo más baja posible).



En la punta del conductor, al no disponer del espacio suficiente, las cargas se tienen que resignar a estar más apretadas. Es lo que ocurre con las personas que ocupan zonas urbanas, donde el terreno utilizable es mucho más escaso que en las zonas rurales.

La densidad superficial de carga es mayor cuanto más pequeña es la superficie. El campo eléctrico alcanza valores muy altos en las puntas de los objetos metálicos afilados. Este es precisamente el fundamento del pararrayos, y se conoce como **poder de las puntas**.

Carácter vectorial del campo eléctrico

Sea cual sea la forma del cuerpo cargado, las líneas de fuerza son siempre perpendiculares a la superficie del mismo. La tangente geométrica, en un punto, a una línea de fuerza indica la dirección que el campo eléctrico tiene en ese punto.

Por otro lado, cuanto más juntas estén las líneas de fuerza, más fuerte será el campo eléctrico (lo cual es lógico, pues cuanto más cerca nos encontremos de la carga, tanto más apretadas aparecerán las líneas de fuerza).

Condensadores

En los siglos XVII y XVIII la curiosidad de los científicos estaba casi absolutamente absorbida por los fenómenos eléctricos. En todos los laboratorios se experimentaba constantemente con la electricidad. En la ciudad holandesa de Leyden, el profesor Musschenbroek experimentaba con diversos artefactos en su laboratorio en el año 1746, intentando cargar eléctricamente el agua de una botella.

El profesor Musschenbroek colocó una lámina metálica alrededor de la botella de vidrio e introdujo un alambre por el cuello.

Después de someter la botella a la acción de un intenso campo eléctrico, se la entregó a su ayudante, que, al disponerse a retirar el alambre, recibió una fuerte descarga.

Algo existía en la botella que podía acumular cargas eléctricas; el profesor Musschenbroek no tardó en averiguarlo; el campo eléctrico hacía que el dieléctrico o aislante (el vidrio de la botella) acumularse las cargas eléctricas, que se podían retirar de los conductores metálicos exterior e interior (las armaduras). A este fenómeno se le llama **polarización del dieléctrico**. La botella de Leyden fue el primer dispositivo práctico para almacenar energía electrostática, es decir, el primer condensador.

Un condensador consta de dos láminas metálicas separadas por un dieléctrico.

MAGNITUDES ESCALARES Y VECTORIALES

En Física existen magnitudes que quedan perfectamente definidas por su intensidad (ésta se representa por un número, que puede ser positivo o negativo). Estas magnitudes se llaman **escalares**. Como ejemplos de magnitudes escalares podemos citar la carga eléctrica, la temperatura, la masa, etc.

Por otro lado, algunas otras magnitudes no quedan determinadas únicamente por su intensidad, sino que es necesario conocer la dirección en que actúan (la velocidad, la fuerza, el campo eléctrico, etc.) y el sentido (hacia adelante o hacia atrás). A estas magnitudes se las llama **magnitudes vectoriales**.

Es costumbre representar las magnitudes vectoriales mediante una flecha cuya punta indica la dirección hacia donde se dirige esa magnitud, y cuya longitud representa proporcionalmente su intensidad.

NOTACION EXPONENCIAL

Cuando se deben manejar cifras muy grandes o muy pequeñas, con gran cantidad de ceros, se acostumbra a emplear la notación exponencial.

En el sistema numérico decimal, que es el que utilizamos en nuestra vida cotidiana, existen diez números diferentes, del 0 al 9.

Cuando una cantidad es 10, 100, 1.000 ó 10.000 veces mayor que otra, añadimos uno, dos, tres o cuatro ceros a la derecha de esa cantidad.

En lugar de escribir todos los ceros, podemos poner una base elevada a un exponente (esto es lo que se conoce como notación exponencial). Como la base de nuestro sistema de numeración es 10, podemos escribir:

$$10^1 = 10.$$

10^2 = es lo mismo que escribir 100, o sea, un 1 seguido de dos ceros.

10^3 = es lo mismo que 1.000, o sea, un 1 seguido de tres ceros.

10^4 = es lo mismo que 10.000, o sea, un 1 seguido de cuatro ceros. Etc.

En cada caso es equivalente escribir 10^n que poner un 1 seguido de n ceros.

Otro tanto se puede decir para las cantidades muy pequeñas, sólo que esta vez escribimos el exponente negativo:

10^{-1} es lo mismo que 0,1.

10^{-2} es lo mismo que 0,01.

10^{-3} es lo mismo que 0,001.

10^{-4} es lo mismo que 0,0001. Etc.

En cada caso el exponente indica el número de ceros que anteceden al 1, siempre que el exponente sea negativo. El primer cero se considera entero, y se pone la coma a continuación.

Finalmente, si un número cualquiera multiplica a una potencia, 10^n ó 10^{-n} , ese número representa la parte significativa (las primeras cifras que preceden a los ceros) si el exponente es positivo, o el numerador de una fracción cuyo denominador sería la misma potencia con exponente negativo.



Su capacidad de almacenar cargas eléctricas se denomina precisamente **capacidad**, y se mide en una unidad llamada **faradio (F)**, en honor de Faraday.

La definición rigurosa de capacidad de un condensador es: **la relación entre la carga que se le comunica y el potencial eléctrico que esta carga adquiere.**

La unidad de capacidad, el faradio, se define como **la capacidad que debe poseer un condensador para adquirir una diferencia de potencial entre sus armaduras de 1 voltio, cuando entre ellas se deposita una carga eléctrica de 1 culombio.**

En la práctica esta unidad resulta demasiado grande, por lo cual se emplean algunos submúltiplos, como el microfaradio (10^{-6} faradios) y el picofaradio (10^{-12} faradios). Hay que señalar que el campo eléctrico tiene carácter vectorial, es decir, para determinarlo no nos basta con conocer su intensidad, sino que tenemos que conocer, además, su dirección y su sentido. Por eso, la dirección y sentido del campo dependen de la polaridad aplicada a las láminas o armaduras del condensador.

Sistemas lineales. Principio de superposición

Una propiedad muy importante que poseen los sistemas de cargas electrostáticas es la siguiente:

Si imaginamos una distribución cualquiera de cargas eléctricas, el campo en un punto es la suma de los campos debidos a cada carga. Es decir: consideramos solamente una carga y determinamos el campo que ella determina en un punto.

A continuación consideramos otra carga y determinamos otro nuevo campo que esta última carga determina en el mismo punto. La suma de los dos campos nos da el campo resultante producido por las dos cargas. Esto es cierto, sea cual sea el número de cargas (ver Apéndice 2, nota 5).

Dicho en otras palabras: si dibujásemos en un papel transparente el campo debido a cada carga y colocásemos todos los papeles transparentes uno sobre otro, el campo resultante sería la suma de los campos individuales. La figura resultante final no se modifica, independientemente de cuáles de estos papeles transparentes estén encima o debajo de los demás.

A esta propiedad se la conoce como **principio de superposición**. Los sistemas que cumplen dicho principio se llaman **sistemas lineales**, y entre ellos se encuentran los sistemas electrostáticos.

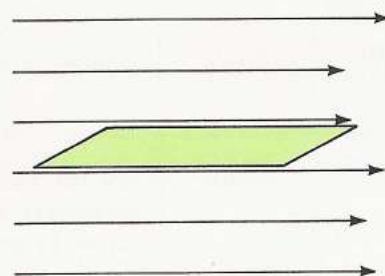
Flujo de un vector

Todos captamos, de manera intuitiva, la noción de flujo como «algo que pasa» o «algo que fluye».

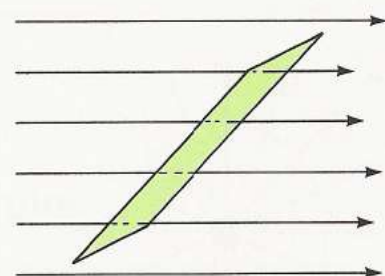
En Física se define el **flujo de una magnitud vectorial** como la cantidad de vectores que atraviesan una unidad de superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación.

Utilicemos una analogía que nos ayudará a comprender este concepto. Consideremos una corriente de agua, y representemos las trayectorias de las moléculas de agua mediante vectores o flechas.

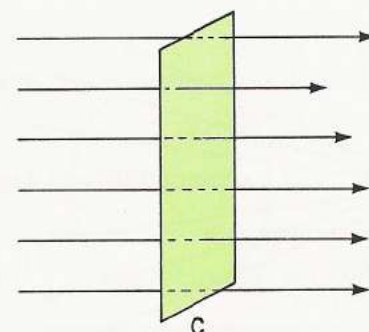
Si queremos medir la cantidad de agua (esto es, el flujo) que atraviesa una unidad de superficie determinada y la colocamos como en A, es evidente que obtendremos una lectura nula: ninguna molécula de agua (o ninguna línea de fuerza, en general) atravesará la superficie. Si la colocamos como en C, también aparece claro que obtendremos una lectura máxima, ya que todas las líneas de fuerza que es capaz de abarcar la superficie unitaria la atraviesan. Cualquier otra posición, como la de B, nos dará una lectura intermedia. Precisamente la situación representada en C es la que empleamos para definir el flujo de un vector.



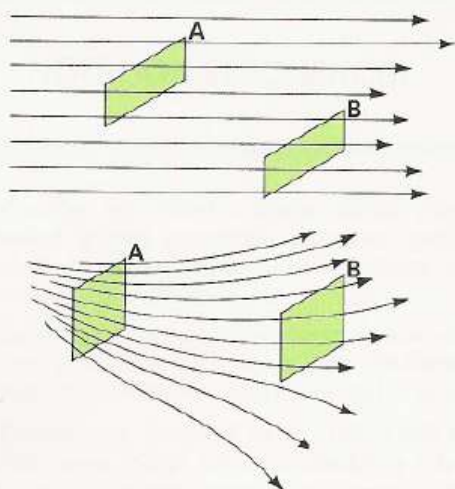
A



B



C



Pero el flujo de un vector no depende solamente de cómo coloquemos nuestra superficie unidad. Depende, además, de la distribución de líneas de fuerza y de la intensidad que la magnitud tenga en el punto donde queremos determinar el flujo; en definitiva, depende de cómo sea la distribución geométrica del campo vectorial (región del espacio donde se manifiesta el fenómeno vectorial cuyo flujo deseamos determinar).

Por ejemplo, en la figura vemos varias clases de campos, en cada uno de los cuales obtendríamos diferentes medidas del flujo en las posiciones A y B.

Teorema de Gauss

Con los conocimientos que ya tenemos sobre las cargas eléctricas y los campos que éstas determinan queda claro que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie será tanto mayor cuanto más intenso sea el campo (o sea, cuanto mayor sea la carga) y cuanto más cerca esté la superficie de la carga (es decir, cuanto más intenso sea el campo).

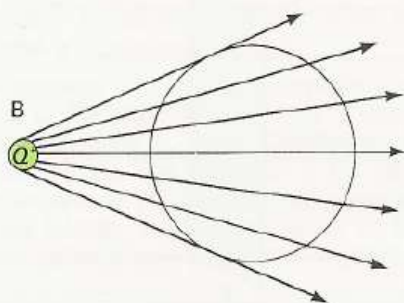
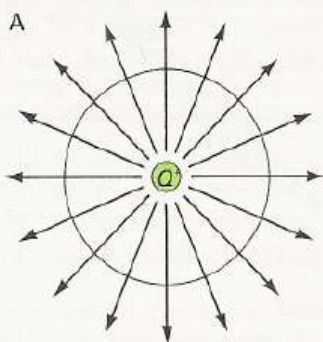
Si consideramos ahora el flujo total a través de una superficie cerrada (que, por simplicidad, podemos considerar esférica, aunque podría tener cualquier forma), dicho flujo será directamente proporcional a la carga encerrada en el interior de la superficie.

Al estar la carga encerrada dentro de la superficie, todas las líneas de fuerza atravesarán la superficie (A). Si la superficie es exterior a la carga (B), el mismo número de líneas de fuerza que están entrando en la superficie por la izquierda saldrán de ella por la derecha. En ese caso el flujo total será nulo.

Esta es, precisamente, la expresión del **teorema de Gauss**, cuyo enunciado es:

Cuanto mayor sea el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada, mayores serán las cargas eléctricas encerradas en ella.

Si, a través de una superficie cerrada, el flujo del campo eléctrico es nulo, en su interior no existen cargas eléctricas.



Principales magnitudes eléctricas

MAGNITUD		SIGNIFICADO	UNIDAD	
Nombre	Símbolo		Nombre	Símbolo
Tensión	V	Fuerza de naturaleza eléctrica que existe entre dos puntos cualesquiera de un circuito sometidos a distinto potencial.	Voltio	V
Corriente	I	Cantidad de electrones que circulan por un conductor en un segundo.	Amperio	A
Resistencia	R	Característica de los materiales que se opone al paso de la corriente.	Ohmio	Ω
Potencia	P	Trabajo eléctrico desarrollado en una unidad de tiempo.	Vatio	W
Energía	E	Aptitud de un sistema para desarrollar un determinado trabajo. Se mide en julios (vatio/segundo). Para usos prácticos se emplea el vatio-hora ($1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ J}$).	Julio	J
Capacidad	C	Proporción entre carga que se comunica a un conductor y potencial o tensión que adquiere.	Faradio	F

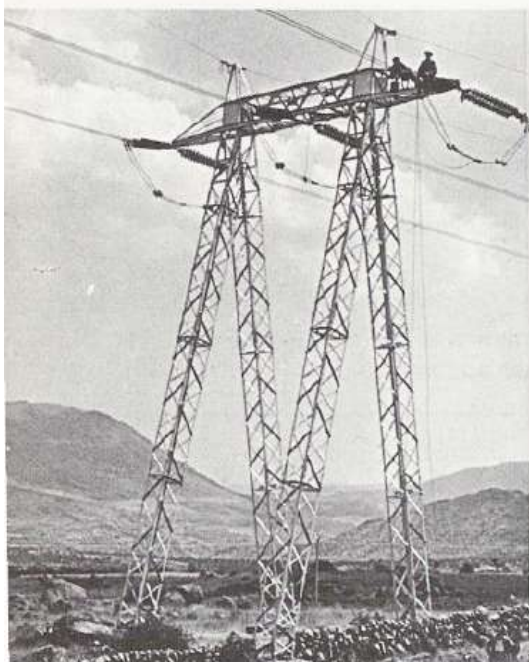
Múltiplos y Submúltiplos

ABREVIATURA	PREFIJO	DENOMINACION	VALOR NUMERICO	EJEMPLOS
M	mega	millón	1.000.000	MW = megavatio = 1.000.000 W
k	kilo	millar	1.000	kW = kilovatio = 1.000 W
m	mili	milésima	0,001	mA = miliamperio = 0,001 A
μ	micro	millonésima	0,000.001	μF = microfaradio = 0,000.001 F



CORRIENTES ELÉCTRICAS

Cargas eléctricas en movimiento



La corriente eléctrica se transporta mediante redes de alta tensión.

Hasta aquí solamente nos hemos ocupado de las cargas electrostáticas, es decir, cargas en reposo.

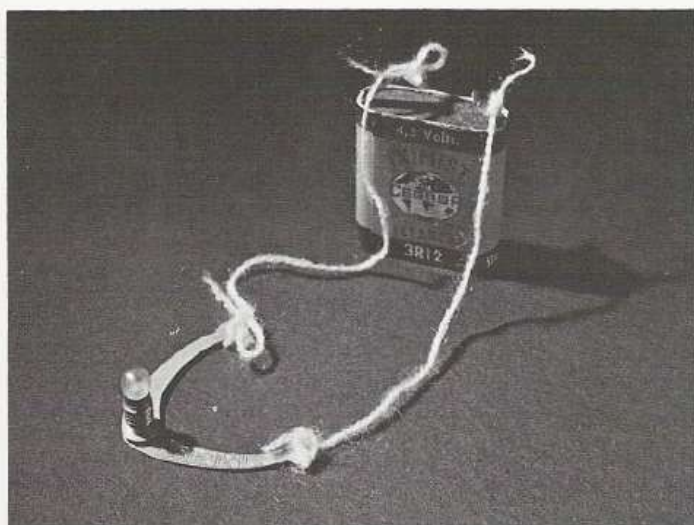
Hemos visto que existe una forma de energía electrostática (entendiendo como energía la capacidad de realizar un trabajo) que se manifestaba por atraer cuerpos de poco peso. Es muy importante tener en cuenta que dicha energía electrostática está asociada a las cargas eléctricas, que forma parte indisoluble de la propia naturaleza eléctrica y que no depende de que la materia se esté moviendo o no.

Entramos ahora en un interesantísimo capítulo de los fenómenos eléctricos. Estas cargas eléctricas ya no se encuentran en reposo, como ocurría en los fenómenos electrostáticos.

Para todos los efectos, **una corriente eléctrica es lo mismo que unas cargas eléctricas en movimiento.** Ambos conceptos son idénticos e intercambiables.

Pero tenemos que hacer saber que sólo existirá corriente eléctrica cuando exista movimiento de cargas positivas o negativas, pero separadas.

Eso significa que, si desplazamos un trozo cualquiera de materia eléctricamente neutra, no estamos produciendo corriente eléctrica. Ya sabemos que la materia está formada por cargas eléctricas; pero, si la materia es neutra, significa que existen tantas cargas eléctricas positivas como negativas y, por tanto, al desplazar la materia de un lado para otro, estamos desplazando juntas las cargas positivas y las negativas, con lo cual no aparecerá ningún campo eléctrico.

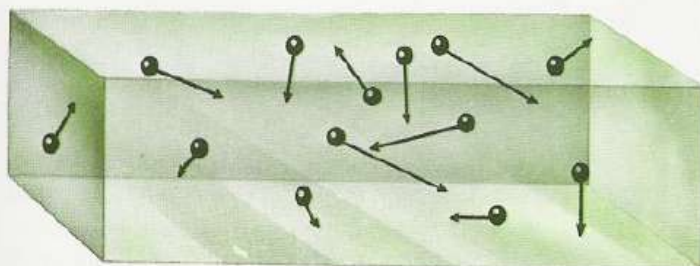


La lana no tiene facilidad para que se separen sus cargas. Es una sustancia aisladora.

Como vemos, pues, la corriente eléctrica sólo se podrá producir en el caso de que exista cierta facilidad para que se separen las cargas positivas de las negativas. Precisamente esta mayor facilidad para que se puedan separar las cargas entre sí determina la clasificación de los materiales en **conductores** y **aisladores**, es decir, que permiten o no el paso de corriente eléctrica a su través (ver Apéndice 2, nota 6).

Densidad de corriente

Imaginemos un volumen de materia donde circula una corriente eléctrica. Las cargas circulan, en general, en direcciones aleatorias (o al azar).



Si las cargas son de distinto signo, unas irán en sentido contrario a las otras, para un mismo campo eléctrico aplicado. Si, además, el campo aplicado varía de un lugar a otro, también lo hará la cantidad de cargas eléctricas que se desplacen en una determinada dirección.

PORTADORES DE CARGA

Más que considerar las cargas aisladas, conviene considerar el concepto de «**portadores de carga**». En un átomo de materia existen cargas positivas (protones) y cargas negativas (electrones). Ambas cargas son iguales y de signo contrario. A efectos de su contribución a la corriente eléctrica, es lo mismo que un protón viaje de derecha a izquierda, que un electrón lo haga de izquierda a derecha. No obstante, hay otros factores a considerar. Como partículas materiales que son, el protón y el electrón tienen un peso (o, dicho con más precisión, una masa). Ambas masas son muy distintas. De hecho, la masa del protón es 1.840 veces más grande que la del electrón. Para un determinado campo eléctrico que apliquemos, está claro que el electrón tendrá 1.840 veces más facilidad para moverse que el protón. Por eso, al estudiar el mecanismo de la conducción eléctrica, interesa mucho conocer la movilidad de los portadores de carga.

Este razonamiento que aquí se aplica a las partículas atómicas como portadoras de carga se puede extender a las moléculas de algunas sustancias, que se pueden separar formando portadores de carga separados (iones), los cuales también pueden contribuir al proceso de conducción eléctrica.

EL VECTOR DENSIDAD DE CORRIENTE

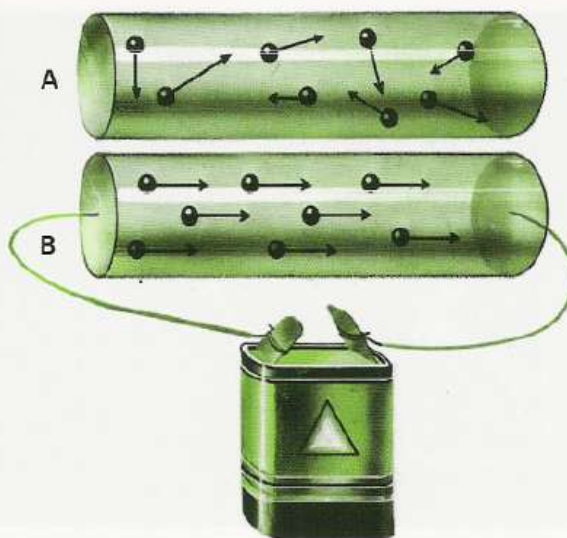
El vector densidad de corriente tiene una dirección y un módulo distintos en cada punto. Este vector resulta muy útil cuando las cargas se mueven en un medio extenso (un medio tridimensional en el que las tres dimensiones son comparables). En el caso de un conductor alargado, que es el de los cables normales, interesa más analizar el transporte de cargas en la dirección del conductor. Por eso nos resulta más útil considerar el flujo del vector $\vec{J}$ a través de una superficie unidad perpendicular a la dirección que lleva el conductor. Dicho flujo se conoce como «intensidad». En el concepto de intensidad eléctrica no interviene la superficie. Suponemos que esa superficie es constante a lo largo del recorrido y que el material es homogéneo, por lo cual las cargas circulan igualmente por cualquier lugar de la superficie.



Vector $\vec{J}$ = densidad de corriente. Muy apropiado para medios tridimensionales extensos.



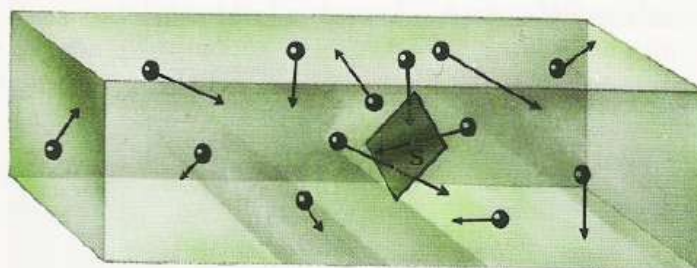
Flujo del vector $\vec{J}$ = intensidad de corriente. Muy apropiado en conductores alargados.



En A no existe campo. En B, los portadores de carga se mueven en una dirección.

Para todos los efectos, es lo mismo considerar que una carga eléctrica positiva se mueva en un sentido como que una carga eléctrica negativa igual a ésta se mueva en sentido contrario.

Recordando la definición de flujo que dimos en el capítulo de Electrostática, ahora podemos ampliar el concepto de flujo de portadores de carga. Si consideramos una superficie unidad S colocada en el interior del material, cuanto más cargas, mayores, y más numerosas sean en la unidad de tiempo, mayor será el flujo de portadores de carga a través de dicha superficie.

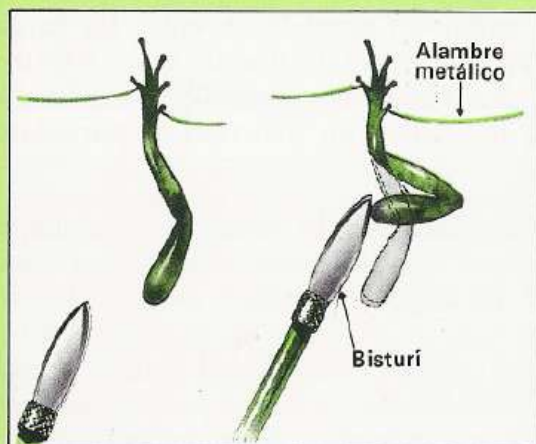


Nos es muy útil definir un vector llamado **densidad de corriente**, que es igual al producto de la carga eléctrica (con su signo correspondiente) por su velocidad y por el número de cargas que haya. Al tratarse de un producto de tres factores, es obvio que cuanto mayor sea cualquiera de los factores, mayor será el producto, es decir, la densidad de corriente.

ORIGEN DE LA CORRIENTE ELECTRICA. EXPERIMENTOS DE GALVANI Y VOLTA

Galvani trabajaba en la Universidad de Bólonia como fisiólogo. Preparaba disecciones para que los alumnos practicasen con ellas. Una vez, cuando estaba trabajando con ranas y cerca de su mesa había una máquina electrostática (1), Galvani observó que las patas de una rana se contraían al tocarlas con un objeto metálico, si la máquina electrostática estaba en funcionamiento.

Era evidente que existía una relación entre las contracciones musculares de la rana y los fenómenos eléctricos.



La pata de rana se contrae al tocarla con un objeto metálico.

Galvani creyó que el origen de los fenómenos eléctricos residía en el músculo de la rana, es decir, suponía que existía una electricidad animal.

Otro paisano de Galvani, llamado Volta, no estaba de acuerdo con esta explicación. Volta opinaba que el origen de la corriente eléctrica estaba en el contacto entre dos metales

(1) Máquina electrostática es cualquier dispositivo capaz de producir cargas eléctricas. En el caso de la experiencia de Galvani, las cargas eléctricas producían un campo que se transmitía a la pata de la rana por medio del bisturí metálico y del alambre del que estaba colgada.

distintos y que el músculo de la rana no era más que un sistema capaz de demostrar el paso de corriente, pero no una causa para que dicha corriente apareciese.



Luigi Galvani.



Alessandro Volta.

Ambos científicos sostuvieron muchas discusiones sobre el tema, defendiendo cada uno de ellos su punto de vista.

Resultó que el que tenía razón era Volta y que la pretendida «electricidad animal» de Galvani no existía.

Volta llegó a ser muy famoso en su época gracias al sistema que empleaba para construir pilas eléctricas y baterías. Colocaba alternativamente discos de metales distintos, intercalando entre ellos trozos de fieltro empapados en un electrolito.

Intensidad de corriente

Al flujo del vector densidad de corriente se le llama **intensidad de corriente**. Esta magnitud es muy importante, ya que nos da idea de cuántas cargas circulan por un conductor determinado. Podemos comparar la corriente eléctrica con el símil de una corriente de agua en un río.

Análogamente, se podría definir su flujo en un punto determinado, que llamaríamos intensidad de corriente de agua.

En ambos casos, resulta evidente que el flujo sería mayor cuantas más cargas hubiese (o cuanto más agua llevase el río). También está muy claro que, cuanto mayor fuese la velocidad del agua (o de las cargas), mayor sería dicho flujo. Lo que no resulta tan fácil es hallar un paralelismo entre las cargas y el agua. Tan sólo existe un tipo de agua, mientras que existen dos clases de carga. La comparación queda, pues, limitada a un solo tipo de portadores de carga.

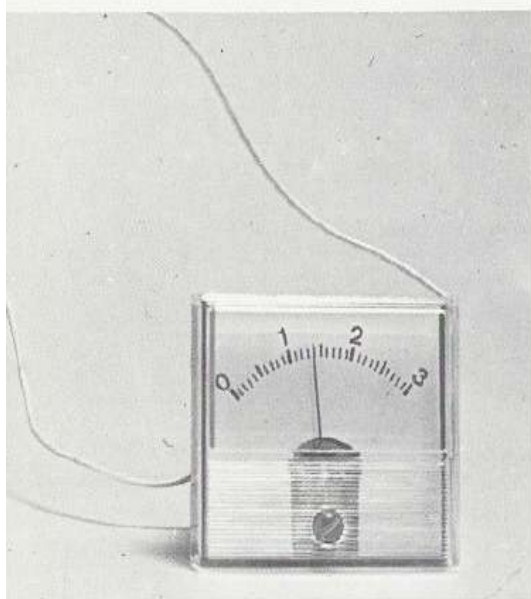
La intensidad eléctrica se mide en **amperios** (la unidad se llama así en honor del físico francés André-Marie Ampère. La unidad natural de carga ya vimos que es el electrón. No obstante, en la práctica se utiliza otra unidad mucho mayor (6.200.000.000.000.000.000, o sea, $6,2 \cdot 10^{18}$ veces mayor) que se llama **culombio**, en honor del también físico francés Coulomb, que fue el que formuló la expresión matemática de la ley que lleva su nombre (ver Apéndice 2, nota 1).

Según el símil de la corriente de agua, la intensidad tiene que ser la magnitud que relacione el número de cargas que pasan por un conductor con el tiempo que tardan en pasar, y la ecuación que la define será

$$\text{Intensidad } I = \frac{\text{carga } Q}{\text{tiempo } t}$$

y la ecuación que relaciona las unidades de medida es:

$$1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ segundo}}$$

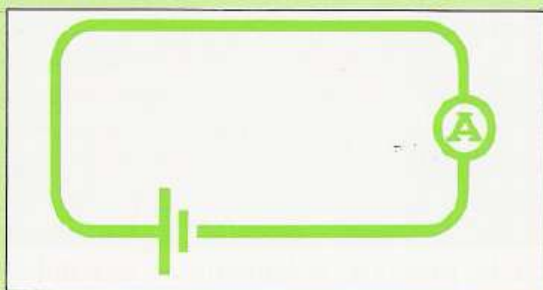


Galvanómetro. Es un instrumento destinado a detectar el paso de corrientes eléctricas.

AMPERIMETROS

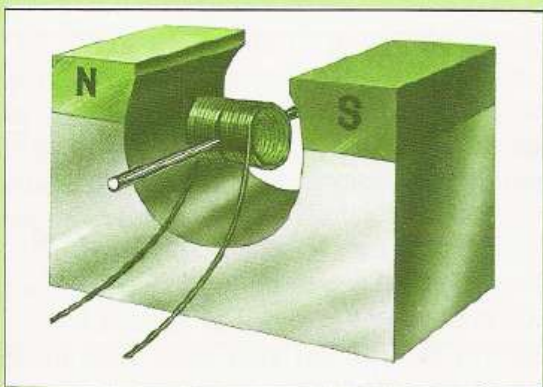
Para medir la corriente que circula por un conductor se intercala en éste un aparato llamado **amperímetro**.

Es muy importante que toda la corriente que se desea medir pase por el instrumento. Por eso se debe cortar el circuito y colocar el amperímetro entre los dos extremos. (Esto se llama conexión en serie.)



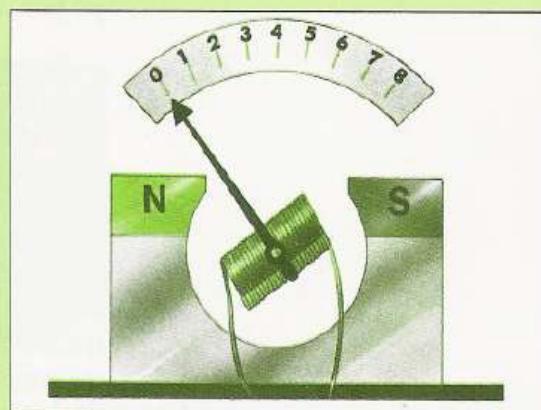
El amperímetro consta de un imán fijo, entre cuyos extremos se encuentra una bobina móvil capaz de girar alrededor de un eje.

Al pasar la corriente por la bobina, se crea un campo magnético (más adelante estudiaremos esto en el capítulo dedicado al Magnetismo).

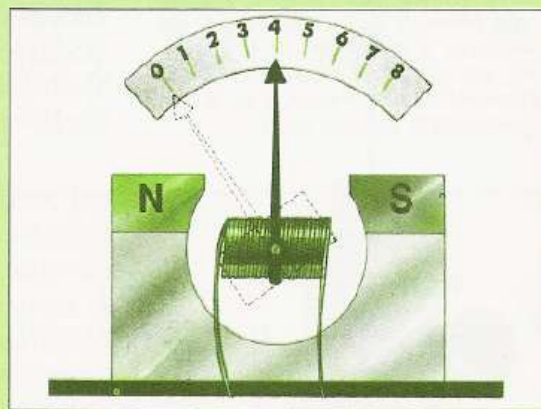


El campo magnético creado por la bobina se opone al campo del imán fijo, con lo cual aparece una fuerza que aleja a la bobina de su posición inicial de equilibrio.

Se une una aguja indicadora a la bobina, de manera que se mueva solidariamente con ella. Las desviaciones de la bobina y de la aguja son proporcionales a las intensidades de corriente que recorren la bobina.



Detrás de la aguja se coloca una escala graduada en amperios (o miliamperios, o microamperios).



Según sean la sensibilidad y las unidades de la escala, el instrumento se denominará **amperímetro**, **miliamperímetro** o **microamperímetro**.

Los microamperímetros de gran sensibilidad (es decir, capaces de medir corrientes extremadamente pequeñas) se llaman a veces **galvanómetros**.

Conducción metálica.

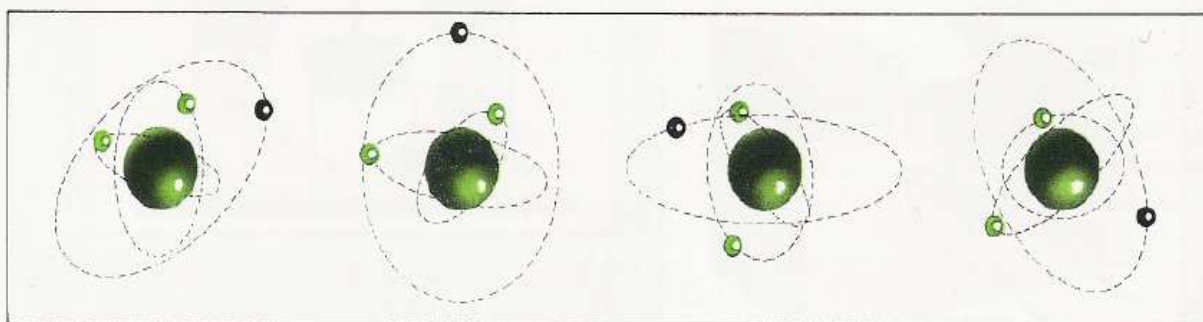
Flujo de electrones

Recordemos la constitución atómica de la materia. La materia, que en conjunto resulta eléctricamente neutra, está formada por átomos, que también son eléctricamente neutros, es decir, tienen la misma cantidad de cargas positivas que negativas. Las cargas positivas se encuentran asociadas a los protones, que son unas partículas de gran tamaño y, por consiguiente, de muy escasa movilidad.

Alrededor del núcleo de las partículas positivas se encuentran las partículas de carga negativa, los electrones. Estos tienen una carga negativa igual y opuesta a la del protón y una masa mucho menor (1.840 veces menor) que la de éste. Esto quiere decir que los electrones tienen una facilidad para moverse muchísimo mayor que los protones. Por ello, su contribución a la conducción de corriente eléctrica es infinitamente más importante que la de los protones. En la práctica, solamente el movimiento de los electrones basta para poder explicar el proceso de la conducción eléctrica.

Los electrones externos sufren menos la atracción del núcleo que los más cercanos. Precisamente por ello gozan de mayor movilidad y son los que contribuyen al mecanismo de la conducción eléctrica. Los electrones externos se llaman también «electrones de conducción», y en la figura se han representado en color negro.

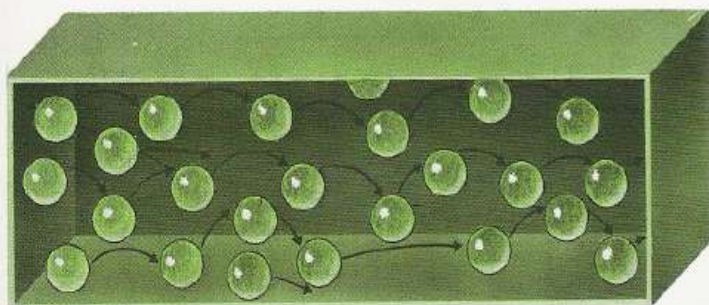
Imaginemos una serie de átomos adyacentes donde los electrones más externos son los más móviles, ya que, al estar más alejados del núcleo positivo (recordemos la ley de Coulomb), sufren una fuerza atractiva mucho menor que los electrones de otras capas más cercanas al núcleo.



Si, mediante un proceso exterior, provocamos la liberación de estos electrones externos y establecemos la circulación de una corriente eléctrica por el material, los electrones más externos de un átomo irán desde un átomo al siguiente, transportando la carga eléctrica de uno a otro átomo. Existirá, pues,

un flujo o circulación de electrones de un extremo a otro del material. Cada vez que ocurra un salto de un electrón de un átomo a otro, el segundo átomo quedará eléctricamente equilibrado, mientras que el primer átomo presentará el defecto de una carga negativa, que se compensará con el electrón procedente del átomo anterior.

De esta manera, los electrones realizan solamente pequeños desplazamientos, ya que, en cada salto, únicamente pasan de la capa externa de un átomo a la capa externa del átomo vecino.



Para todos los efectos, si dejamos de considerar el aspecto microscópico de la materia y la estudiamos macroscópicamente (desde fuera) sin preocuparnos de lo que ocurre en su interior, al entrar por un extremo del material un electrón, saldrá otro electrón por el otro extremo. Como todos los electrones son iguales, ocurre como si el electrón que entra por la cara A saliese por la cara B.

En realidad, desde el punto de vista teórico, los electrones son partículas indistinguibles. Si dejamos que la corriente circule durante un tiempo suficientemente largo, el electrón que entra por la cara A saltará de uno a otro átomo y terminará saliendo por la cara B. No obstante, el salto de electrones de un átomo al contiguo es un proceso casi instantáneo (la velocidad de propagación de este fenómeno es igual a la de la luz, que es de unos 300.000 km/s), con lo cual, nada más iniciarse el proceso, en el instante en que un electrón entra en el material, otro electrón absolutamente idéntico sale del mismo.

Así, pues, existe una circulación real de electrones que se transmiten de un extremo a otro del material de la misma forma que el agua se desplaza por el interior de un tubo.

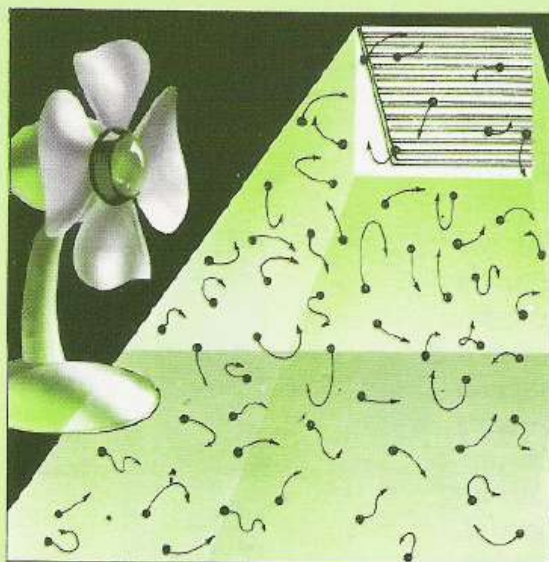


¿COMO SE MUEVEN LOS ELECTRONES EN LOS METALES?

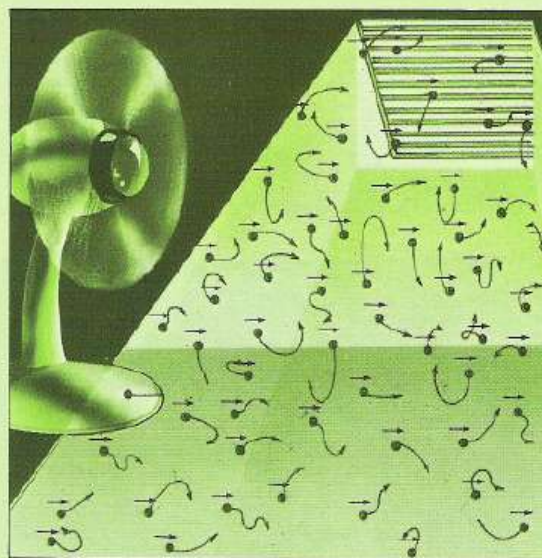
En realidad, la materia no está quieta. Los electrones de los átomos no están en reposo. Todos ellos se mueven espontáneamente, yendo de una a otra parte constantemente, tanto más de prisa cuanto más elevada sea la temperatura. Desde fuera (o sea, macroscópicamente) nuestros sentidos no pueden apreciar estos movimientos, pero podemos imaginar una comparación que nos ayudará a comprender el fenómeno.

Imaginemos un ambiente oscuro (por ejemplo, una cueva o un sótano) donde penetre un haz de luz a través de una rejilla.

El aire siempre tiene partículas de polvo en suspensión, que veremos iluminadas cuando pasen por el haz luminoso. Si observamos detenidamente el movimiento de estas partículas de polvo, veremos que están constantemente vagabundeando de un sitio para otro, sin ninguna dirección definida.



Si ahora encendemos un ventilador y apuntamos el chorro de aire hacia las partículas iluminadas por la luz, veremos que éstas continúan realizando los mismos movimientos



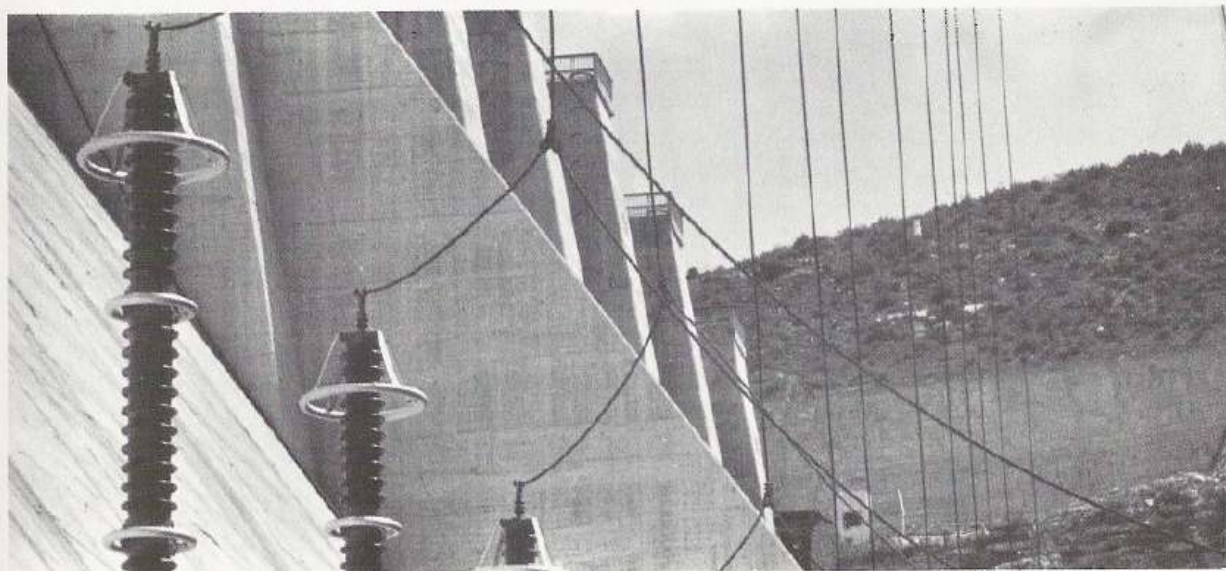
desordenados de antes, pero además se desplazarán en la dirección que las transporte la corriente de aire producida por el ventilador.

Lo mismo sucede con los electrones en un metal. Al aplicar una diferencia de potencial, se superponen los movimientos desordenados de los electrones (originados por causas térmicas) y el debido al desplazamiento producido por la corriente eléctrica. Una vez más se trata de una suma o composición vectorial de movimientos cuya resultante será el transporte de cargas a lo largo del metal conductor.

Propiedades eléctricas de los materiales. Conductores y aisladores

Hemos visto que el mecanismo de la conducción de corriente eléctrica implica el desplazamiento de los electrones de las capas externas. Pero no todos los materiales tienen la propiedad de que los electrones externos de sus átomos puedan pasar fácilmente de un átomo a otro.

De aquí surge una gran diferenciación entre los materiales. Si los electrones tienen facilidad para desplazarse, el material permite el paso de la corriente eléctrica a su través y se dice que es **conductor**.



Por el contrario, si el material tiene sus átomos ordenados de forma que los electrones externos no pueden pasar fácilmente de uno a otro átomo, la corriente eléctrica no puede pasar a su través, y al material se le conoce como **no conductor, aislador o dieléctrico**.

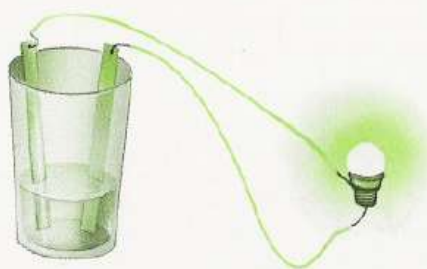
Como ejemplo de materiales del primer tipo podemos citar los metales. Precisamente el criterio químico que se sigue para distinguirlos es la movilidad de los electrones de las capas externas.

Los metales son, desde el punto de vista práctico, los conductores eléctricos que más aplicación tienen en la vida real.

Hilos conductores metálicos y aisladores de vidrio y cerámica en una instalación de alta tensión.

COMO CONSTRUIR UNA PILA ELECTRICA

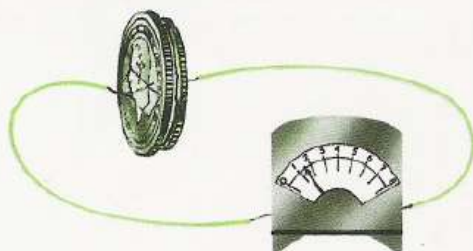
Cualquiera puede construir una pila eléctrica tomando dos trozos de dos metales distintos, por ejemplo, dos laminitas o dos alambres de cobre y de cinc, e introduciéndolos en un vaso con agua, a la cual se añaden unas gotas de algún ácido (se puede utilizar el jugo de varios limones, vinagre, etcétera).



Este fue el procedimiento que empleó Volta para fabricar su batería eléctrica, poniendo muchos elementos como éste en serie.

La corriente producida se puede poner de manifiesto con una bombillita de linterna lo más pequeña posible.

También se puede improvisar una pila de muy poca potencia empleando dos monedas de distintos metales —por ejemplo, una peseta y un duro— e interponiendo entre ellas un papel previamente humedecido en saliva.



La mejor manera de apreciar la corriente producida es hacerla pasar por un instrumento de medida muy sensible (un microamperímetro o un galvanómetro).

Todos sabemos que las redes de distribución eléctrica —desde las centrales productoras de energía eléctrica hasta los aparatos domésticos— están formadas por hilos y cables metálicos de distintos grosores.

También forman parte importante de los sistemas eléctricos los aisladores. Los puntos de unión de los cables a las torres metálicas (por tanto, conductoras) que los soportan constan de columnas de material no conductor (llamadas popularmente aisladores) que suelen ser de vidrio o de cerámica. El vidrio, la cerámica, el plástico, la cera, la resina y el ámbar son materiales aisladores o dieléctricos típicos.

Precisamente los fenómenos electrostáticos que se producen por frotamiento (recordemos el trocito de ámbar) se manifiestan en los materiales dieléctricos, ya que, una vez producida desde el exterior la disociación de cargas eléctricas, la estructura del material impide que éstas se vuelvan a juntar.

A pesar de ello, los fenómenos electrostáticos también se pueden presentar en los conductores, siempre que tomemos la precaución de separarlos de los demás elementos del sistema mediante materiales no conductores.

Otros modos de conducción eléctrica. Conducción no metálica

El mecanismo de conducción eléctrica de los electrones externos que saltan de un átomo al átomo vecino, es decir, la conducción metálica, es la más extendida y generalizada. No obstante, no es el único tipo de conducción eléctrica que existe.

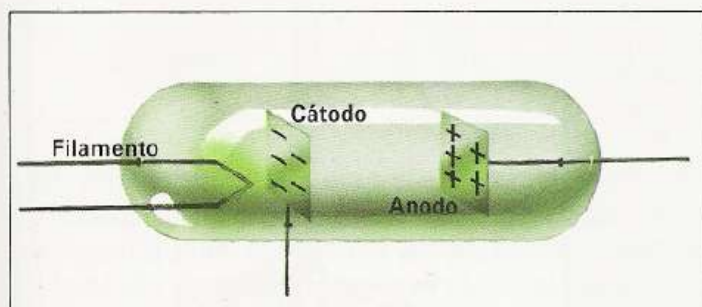
Recordemos que una corriente eléctrica es lo mismo que un transporte de cargas eléctricas. Cualquier sistema que imaginemos que sea capaz de desplazar los portadores de carga podrá ser un vehículo eficaz para transportar corrientes eléctricas.

Como ejemplo, podemos desplazar mecánicamente las cargas eléctricas de un lugar a otro, tal como ocurre en el generador de Van der Graaf (ver Apéndice 2, nota 7).

Otro caso muy importante de transporte mecánico de cargas eléctricas es el de la lluvia. En muchas ocasiones las gotas de lluvia pasan por nubes que poseen elevadas cargas electrostáticas. Las gotas de lluvia atraen algunas cargas y las entregan a su paso por otras nubes con diferentes cargas, o las transportan hasta el suelo, restituyendo así el equilibrio eléctrico en nuestro planeta.

Transporte de cargas en el vacío

Otro sistema de conducción eléctrica es el del desplazamiento de portadores de carga en el vacío. Este es el caso del **diodo** o válvula de vacío, que en esencia consta de un recinto cerrado donde se ha hecho el vacío, es decir, se ha extraído el aire contenido dentro de la ampolla con el auxilio de un aparato llamado «bomba de vacío». Normalmente se trata de una ampolla de vidrio. En el interior de esta ampolla se encuentran unos **electrodos** separados entre sí, llamados **cátodo** y **ánodo**. El cátodo se calienta mediante un alambre incandescente llamado **filamento**. Una vez caliente, el cátodo, que está revestido de unas sustancias especiales, emite electrones, que se quedan rodeándolo, formando como una nube. Si se aplica un campo eléctrico entre el cátodo y el otro electrodo, los electrones irán del cátodo al ánodo, estableciéndose una corriente eléctrica sin ningún medio material.



Gracias a esta conducción en el vacío funcionan muchos dispositivos electrónicos que nos son muy familiares. El diodo es el fundamento de las válvulas electrónicas, de los tubos de TV o de los generadores de rayos X, por ejemplo.

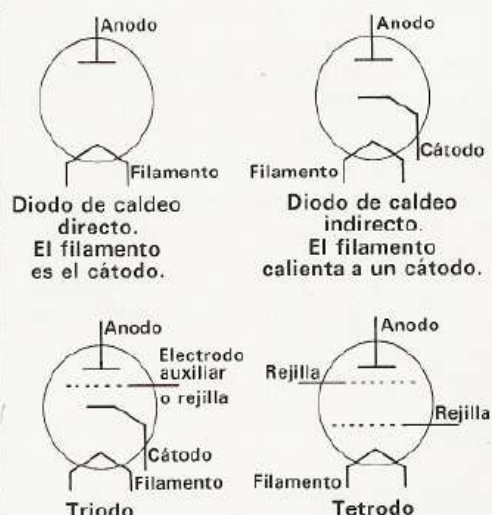
EL DIODO

El diodo o lámpara de dos electrodos fue estudiado y fabricado por primera vez por el americano Edison en 1884.

Consistía en un **filamento emisor de electrones** y un **ánodo o placa** que los atraía cuando estaba cargado positivamente con respecto al filamento.

La aplicación más importante del diodo es la de **rectificador**, ya que solamente permite el paso de corriente a través del dispositivo cuando la placa es positiva con respecto al filamento.

Posteriormente se añadieron más electrodos auxiliares o **rejillas** a este dispositivo, y ello dio lugar a las distintas válvulas electrónicas.



LA ELECTROLISIS EN LOS PROCESOS FISIOLÓGICOS

La variedad de sustancias químicas electrolíticas es inmensa. En particular, las sales de sodio, potasio y calcio desempeñan un papel fundamental en muchos procesos fisiológicos de los animales y del hombre.

La transmisión de información a través del sistema nervioso es un fenómeno de naturaleza no sólo eléctrica, sino electrolítica.

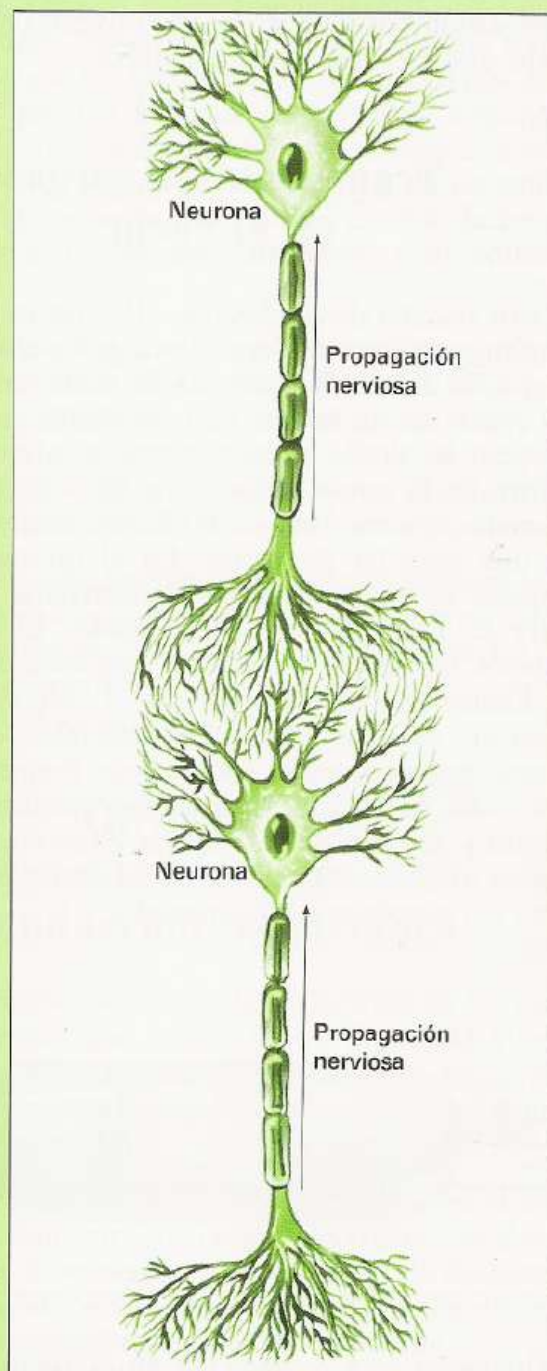
En todas las células del organismo, y entre ellas las células nerviosas o neuronas, existen sales de calcio, sodio y potasio disueltas que constituyen el cuerpo o protoplasma de las células.

La membrana que rodea al protoplasma es algo así como una funda o piel que envuelve a estas sales disueltas en el electrólito celular. Cuando se produce una excitación externa cualquiera, se desencadena un intercambio de iones de Ca^{++} y de K^{+} a través de la membrana celular, lo que da lugar a una polarización instantánea de la membrana, que desaparece en cuanto se establece el equilibrio iónico de Ca^{++} y de K^{+} .

La excitación nerviosa es, pues, un fenómeno electrolítico que se propaga a lo largo de la neurona, y de ésta a otra, sucesivamente, hasta llegar al cerebro.

La transmisión de la señal nerviosa de una neurona a otra se realiza a través de unas sustancias bioquímicas que unen la membrana celular de una neurona con la de la vecina y que son capaces de transmitir las polarizaciones y despolarizaciones de una a otra neurona mediante un mecanismo electrolítico.

La presencia de otras sustancias bioquímicas puede acelerar o retardar el proceso de propagación, por lo cual la velocidad de transmisión de las señales nerviosas varía entre límites muy amplios, dependiendo del estado de salud, de la emoción, de los factores externos y de otros agentes no muy bien conocidos.

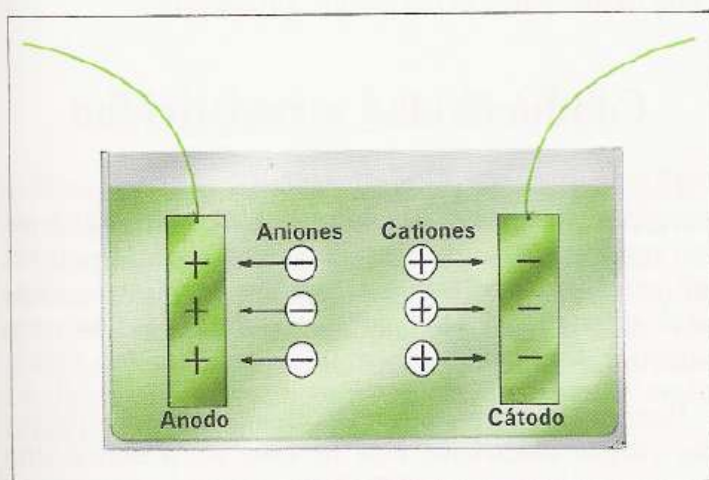


Transmisión de un estímulo nervioso. Es un fenómeno electrolítico que se propaga de una neurona a otra.

Conducción electrolítica

Otra manera de establecer corrientes eléctricas es mediante la **ionización** de algunas moléculas. Algunos compuestos químicos (las sales y los ácidos, principalmente) están formados por moléculas (asociaciones de varios átomos distintos) que poseen un campo eléctrico propio (se conocen como moléculas polares).

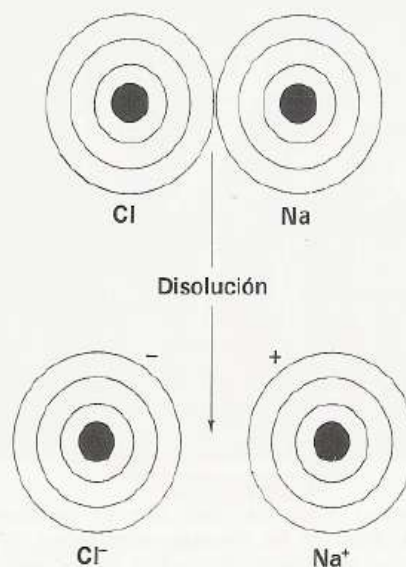
En su estado normal los átomos de una molécula, o las moléculas entre sí, se orientan de manera que las zonas con carga positiva se colocan próximas a otras zonas de carga negativa, neutralizándose así los campos eléctricos. Si estos materiales se disuelven en un líquido llamado **electrólito** (que puede ser agua común), las moléculas se separan en trozos con distinta carga eléctrica, llamados **iones**. Estos iones pueden tener cargas positivas o negativas. En el primer caso se los llama **cationes**; en el segundo, **aniones**.



Si establecemos un campo eléctrico entre unos electrodos introducidos en la disolución (electrodos que, igual que en el caso del diodo, se llaman ánodo el electrodo positivo y cátodo el electrodo negativo), los iones se moverán, obedeciendo la ley de Coulomb, hacia los electrodos de carga contraria; es decir, **los iones positivos (cationes) se dirigirán al electrodo negativo (cátodo), y viceversa**. Los iones, pues, son también portadores de carga y pueden determinar la presencia de una corriente eléctrica a través del electrolito.

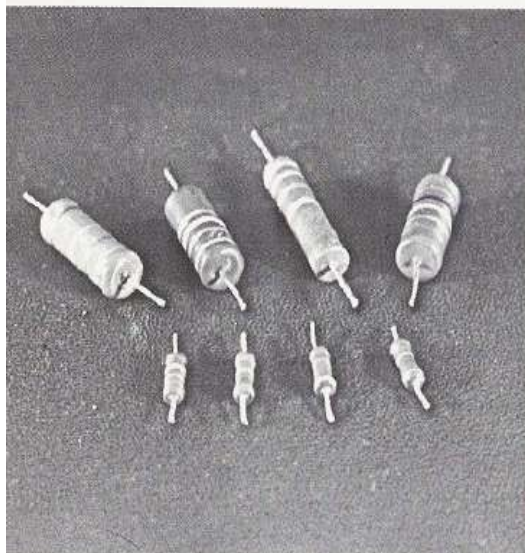
LA SAL: UN FORMADOR DE ELECTROLITOS

Los átomos de los elementos químicos se unen entre sí para formar moléculas. Dependiendo de las características de los elementos químicos componentes, cuando la molécula se disuelve los átomos se pueden separar conservando una cierta carga eléctrica o permaneciendo en estado neutro. Las sustancias del primer tipo (que se dice que poseen un enlace iónico) forman buenos electrolitos al disolverse. Un ejemplo clásico de esta sustancia es el de la sal común o cloruro sódico, que al disolverse da lugar a dos iones: Cl^- y Na^+ .



Los fenómenos electrolíticos son muy importantes en la práctica. Gracias a ellos se pueden producir recubrimientos metálicos de muchos materiales, cambiando así las propiedades químicas de éstos, a la vez que su aspecto estético. Estas técnicas se conocen con el nombre de **galvanoplastia**; con ella se consigue el niquelado, el cromado, el plateado y muchos otros tratamientos superficiales.

Si el material químico de que están compuestos los electrodos y las sustancias disueltas y el electrolito son capaces de reaccionar químicamente entre sí, podemos obtener una energía eléctrica entre los electrodos debido a una reacción química. Si el proceso es irreversible, o sea, que ocurre hasta que uno de los materiales se agota, tenemos el caso de las **pilas eléctricas**, que son **generadores de corriente**. Si el proceso es reversible, es decir, si introducimos desde fuera una corriente eléctrica y podemos regenerar el material que se había agotado y la pila está en condiciones de volver a producir corriente eléctrica, tenemos la **pila recargable** o **acumulador**, que es un generador eléctrico que se utiliza en muchos casos, entre otros en los automóviles.



Resistencias eléctricas. Este tipo de resistencias se utiliza en los montajes electrónicos. Se denominan resistencias de carbón porque están construidas por un soporte dieléctrico alrededor del cual se deposita una fina capa de carbón conductor.

Las resistencias que están destinadas a permitir el paso de corrientes elevadas, se construyen bobinando un alambre sobre un soporte aislante. Por eso se llaman resistencias bobinadas.

Conductividad y resistividad

Las cargas eléctricas se encuentran sujetas a soportes materiales, los portadores de carga. Al mismo tiempo, estos portadores de carga están metidos en un medio donde actúa el campo eléctrico creado por esas cargas o cualquier otro campo eléctrico exterior que actúe sobre ellas.

Cualquier campo eléctrico tiende a hacer mover las cargas eléctricas, con lo cual se produce una corriente. La acción del campo puede o no tener éxito, dependiendo de la naturaleza del medio.

Ya hemos visto que algunos medios permiten el paso de la corriente eléctrica y otros no. Atendiendo a estas propiedades, los podemos clasificar en materiales conductores y aisladores. Pero no todos los materiales son igual de conductores o de aisladores. Unos presentan más facilidad que otros al paso de la corriente, y el mismo material, dependiendo de algunos factores exteriores, puede dejar de ser aislador para convertirse en conductor, o cambiar radicalmente sus propiedades.

El hecho de que un material sea más o menos conductor depende de su **resistividad**, que es una cualidad intrínseca propia de cada uno. Podemos decir lo mismo empleando otro concepto, el de **conductividad**. Ambos conceptos son inversos. Cuanto mayor sea la resistividad, más pequeña será la conductividad, y viceversa:

$$\text{conductividad} = \frac{1}{\text{resistividad}}$$

La corriente eléctrica que se establezca al someter un conductor a un campo eléctrico dependerá, por consiguiente, del campo eléctrico y del material.

En la práctica no se habla de campo eléctrico, sino de otra magnitud más específica y más cómoda de medir, pues nos informa sobre el campo eléctrico aplicado directamente a los extremos del conductor que estamos considerando y que se llama **tensión** o **diferencia de potencial**. La diferencia de potencial se mide en unidades llamadas **voltios**, en honor del investigador italiano Volta.

Resistencia. Ley de Ohm

Una vez más nos resulta útil comparar el flujo de cargas eléctricas, o corriente eléctrica, con el paso de un fluido a través de un tubo. Imaginemos un tubo por el que circula una corriente de agua. Según sea el estado superficial de las paredes interiores del tubo, el agua circulará con más o menos facilidad, es decir, encontrará mayor o menor **resistencia** a pasar por el tubo.



Cuanto más largo sea el tubo, más resistencia tendrá el agua a su paso por él.



Cuanto mayor sea la sección del tubo, mejor circulará el agua.

DIFERENCIA DE POTENCIAL Y DIFERENCIA DE ALTURA

El potencial es un concepto físico-matemático abstracto que nos da idea del nivel que alcanza una determinada magnitud física en un cuerpo.

Cuando nos ocupamos de la energía gravitatoria decimos que los cuerpos poseen un **potencial**, el cual depende de la altura a la que se encuentran.

Cuanto más alto esté un cuerpo, es decir, cuanto más alto sea su potencial gravitatorio, mayor cantidad de trabajo podrá efectuar.

En Electricidad ocurre algo parecido. Para que exista una corriente eléctrica entre dos puntos es imprescindible que exista una diferencia de potencial eléctrico entre ellos.



Diferencia de potencial = 0. No hay corriente.



Diferencia de potencial distinta de 0. Existe corriente.

MEDIDA DE LA RESISTENCIA: EL OHMETRO

La resistencia se mide mediante un instrumento llamado **óhmetro**. Pero lo que se mide no es directamente la resistencia, sino que, por aplicación de la ley de Ohm, se mide la corriente que pasa por la resistencia desconocida cuando se le aplica una diferencia de potencial conocida.

El instrumento indicador de un óhmetro es, pues, un amperímetro (o un miliamperímetro, según su sensibilidad) al que se añade una pila, que es la que proporciona la diferencia de potencial necesaria. El circuito se cierra precisamente mediante la resistencia que deseamos medir, y la escala del instrumento, que en realidad mide corriente, indicará el valor de la resistencia desconocida, expresado directamente en ohmios.



No circula ninguna corriente, ya que el circuito está abierto.



La corriente que circula es máxima, ya que la resistencia es cero, al unir (o cortocircuitar) los cables. En realidad, R nunca puede llegar a ser cero, ya que los cables presentan una cierta resistencia, por lo cual la corriente nunca puede llegar a ser infinita.



Al cerrar el circuito con una resistencia R , la corriente que circula hará que la aguja del instrumento indique una lectura R , expresada directamente en ohmios.

La cantidad de agua que pase por el tubo dependerá de la resistencia que éste oponga al paso del agua.

Si disponemos de dos tubos de igual sección, pero uno de ellos de doble longitud que el otro, es evidente que el más largo opondrá una resistencia doble que el otro al paso de la corriente de agua. Así, pues, la resistencia será directamente proporcional al tipo y naturaleza del tubo, y a su longitud.

Pero ¿qué sucede si en lugar de emplear el mismo tubo empleamos otro más grueso, es decir, de mayor sección?

Está muy claro que, cuanto más grueso sea el tubo, mejor circulará el agua por él (es decir, menor será su resistencia). Pues bien, todo este razonamiento es perfectamente aplicable al caso de una corriente eléctrica que circule por un material.



Conductor corto
resistencia pequeña



Conductor largo
resistencia grande



Conductor fino
resistencia grande



Conductor grueso
resistencia pequeña

Si llamamos R a la resistencia, y ρ a la resistividad, tenemos que

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

donde l = longitud del conductor, y s = sección del mismo. (Ver Apéndice 2, nota 8.)

La resistencia R se mide en **ohmios** (nombre que deriva del de un físico alemán llamado **Ohm**, quien formuló la expresión de la resistencia por primera vez).

Precisamente a Ohm debemos también la formulación de la ley que lleva su nombre, donde se relacionan la intensidad de corriente, la diferencia de

potencial y la resistencia. Esta ley establece que la **intensidad es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada, e inversamente proporcional a la resistencia del conductor**. Matemáticamente se expresa así:

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

Es decir, para un trozo determinado de conductor mantenido a temperatura constante, la resistencia R del conductor no depende de la corriente que circule por él.

Dimensionalmente, la ley de Ohm, tal como está formulada matemáticamente, relaciona entre sí las siguientes unidades:

$$I \text{ (en amperios)} = \frac{V \text{ (en voltios)}}{R \text{ (en ohmios)}}$$

Superconductividad

Como sabemos, los metales se caracterizan porque los electrones más externos, llamados electrones de conducción, realizan movimientos constantes y desordenados de un lugar a otro en función de la temperatura.

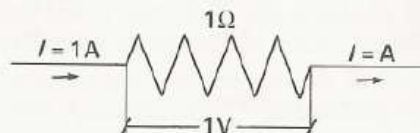
Cuanto más alta sea la temperatura, mayores serán las distancias y velocidades de estos movimientos desordenados de los electrones.

Al aplicar una diferencia de potencial a los extremos del metal conductor, se produce un desplazamiento global de electrones en el sentido del campo eléctrico aplicado, pero sin que dichos electrones dejen de realizar sus movimientos desordenados. Cuando la temperatura es muy alta, estos movimientos desordenados de los electrones adquieren tal magnitud que perturban y dificultan el mecanismo de la conducción eléctrica, ya que se producen choques e interferencias entre unos y otros electrones, disminuyendo la posibilidad del desplazamiento global mencionado anteriormente.

Esta es la razón de que la resistencia de un conductor aumente al aumentar la temperatura.

VOLTIO-AMPERIO-OHMIO

La ley de Ohm permite definir el voltio, el amperio y el ohmio.



Voltio. La diferencia de potencial que existe entre los extremos de una resistencia de 1 ohmio, recorrida por una corriente de 1 amperio:

$$V \text{ (voltios)} = R \text{ (ohmios)} \times I \text{ (amperios)}$$

Amperio. La intensidad de una corriente que pasa por una resistencia de 1 ohmio sometida a una diferencia de potencial de 1 voltio:

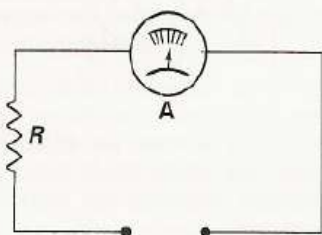
$$I \text{ (amperios)} = \frac{V \text{ (voltios)}}{R \text{ (ohmios)}}$$

Ohmio. La resistencia de un conductor que, sometido a una diferencia de potencial de 1 voltio, es atravesado por una corriente de 1 amperio:

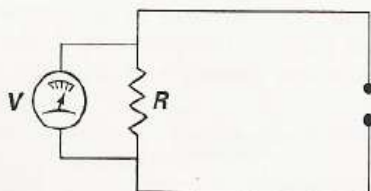
$$R \text{ (ohmios)} = \frac{V \text{ (voltios)}}{I \text{ (amperios)}}$$

POLIMETROS

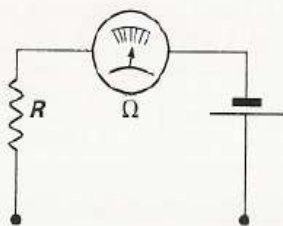
Ya sabemos cómo funciona un amperímetro. Si al instrumento se le añade una resistencia muy grande en serie (R), con él se pueden medir tensiones o voltajes, y entonces recibe el nombre de **voltímetro**.



Los amperímetros se conectan en serie. Toda la corriente que se desee medir debe pasar a través de ellos.



Los voltímetros se conectan en derivación, entre los dos puntos cuya diferencia de potencial queremos determinar.



También sabemos que un óhmetro es un instrumento para medir resistencias, que consta de un amperímetro (o miliamperímetro) con una pila en serie.

Empleando el mismo miliamperímetro y disponiendo de varias resistencias y de una pila, todo ello encerrado en un estuche, se pueden medir indistintamente voltajes, intensidades o resistencias. Estos aparatos se denominan **polímetros** o **multímetros**, y son muy prácticos a causa de su reducido tamaño.

También sucede lo contrario. Si disminuye la temperatura del metal, los desplazamientos desordenados de los electrones se hacen cada vez más pequeños, llegando a desaparecer a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la práctica, la temperatura de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ (o cero absoluto, como se la conoce en Física) es inalcanzable, pero se puede llegar a temperaturas muy bajas, unas pocas décimas de grado por encima del cero absoluto.

A esta temperatura la resistencia de los metales desaparece, se hace igual a cero. Aplicando la ley de Ohm, vemos que **una diferencia de potencial pequeñísima puede producir corrientes extremadamente grandes**. Este fenómeno se llama **superconductividad**.

Semiconductores

La clasificación general que hasta ahora hemos hecho de los materiales en función de su conductividad, agrupándolos en dos clases, conductores y aisladores, no es exacta.

En general, la conductividad de los buenos conductores, los metales, es, aproximadamente, 10^{20} veces superior a la de los materiales aisladores clásicos.

La distinción, pues, entre conductores y aisladores parece tan drástica y definitiva como la que podría establecerse entre líquidos y sólidos. No obstante, en función de la temperatura, un sólido puede convertirse en líquido (pensemos en el alquitrán, en el vidrio, en la cera, etc.). Análogamente, en función de la temperatura, un conductor puede perder conductividad hasta llegar a comportarse como un verdadero aislador, y viceversa.

Existe un grupo de materiales, genéricamente llamados **semiconductores**, cuya conductividad tiene valores intermedios entre los de los conductores y los de los aisladores. En función de la temperatura, o de otros parámetros, la movilidad de los portadores de carga de estos materiales puede variar notablemente. Entre los materiales semiconductores más importantes debemos citar el germanio y el silicio.

Estos materiales juegan un papel esencial en la técnica electrónica. Sus propiedades los hace aptos para realizar funciones que antes únicamente podían desempeñar las válvulas electrónicas de vacío. Gracias a los semiconductores existe el desarrollo actual de la Aviación, las Comunicaciones, la Astronáutica, la Informática, etc. Su importancia es decisiva en todas las ramas de la ciencia, y prácticamente no existe ninguna rama de la actividad humana que no se vea afectada por los semiconductores. Sus aplicaciones en el futuro son aún más prometedoras.

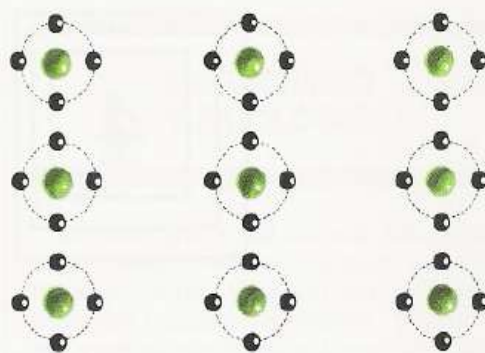
La explicación del comportamiento de los semiconductores hay que buscarla en la teoría atómica de la constitución de la materia.

Los átomos de algunas sustancias tienen la última capa de electrones dispuesta de tal manera que no presenta tendencia a intercambiarlos entre sí. En estas condiciones no existe circulación de corriente, y el material se comporta como un aislador.

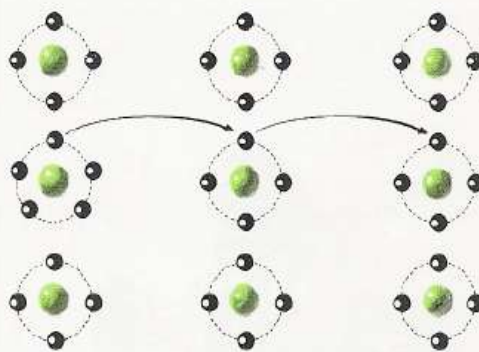
Si a estas sustancias se añaden unas cantidades muy pequeñas de otras sustancias, las propiedades del material semiconductor cambian radicalmente. En el lenguaje técnico estas sustancias se denominan impurezas y son, desde el punto de vista atómico, muy parecidas a las del material semiconductor, con la diferencia de que su última capa tiene un electrón de más o de menos que dicho material. Unas pequeñas cantidades de «impurezas» del primer tipo (con la última capa con un electrón de más) determinan que el material se comporte como un semiconductor de tipo N (portadores negativos de carga).

Si la impureza añadida al material presenta el defecto de un electrón en su última capa, el material se comporta como un semiconductor de tipo P (lo que indica que los portadores de carga son los huecos que deja la ausencia del electrón, o sea, son portadores positivos de carga).

El proceso de fabricación de los materiales semiconductores es sumamente complicado y requiere una gran precisión y exactitud en las operaciones de aportación de «impurezas», ya que un pequeño exceso o defecto en sus proporciones relativas puede estropear todo el material.



Cristal de semiconductor puro. Si se aplica un campo E , no se mueve ningún electrón.



Cristal de semiconductor con impureza de tipo N (1 electrón en exceso). Si se aplica un campo E , el electrón de más se desplaza, contribuyendo a la conducción.



CAMPOS MAGNETICOS

El descubrimiento del imán

Ahora vamos a iniciar el estudio de otro campo: el campo magnético. Para ello seguiremos aproximadamente el desarrollo histórico de las observaciones realizadas por el hombre sobre los fenómenos magnéticos.

¿De dónde procede la palabra «magnético»? se preguntará el lector. Parece ser que, al igual que la electricidad, su origen es griego. La leyenda asegura que fue un pastor de la lejana antigüedad griega, llamado Magnes, el primero que observó la propiedad que presentaba un determinado mineral de hierro de atraer hacia sí trozos de hierro, pero no otros metales.



El pastor de la Antigua Grecia, Magnes, observó cómo cierto mineral atraía al hierro.



Hierro



Cobre

El descubrimiento de la **magnetita** (que así se llama este mineral de hierro) fue, probablemente, accidental. Podemos imaginar el asombro del sencillo pastor Magnes ante el comportamiento tan insólito de una piedra encontrada en el campo.

Las primeras observaciones sobre el comportamiento de la magnetita o «piedra imán» ponían de relieve tres cosas:

1. La magnetita atrae solamente al hierro y al acero, no actuando sobre otros metales.

2. Si se frota un trozo de hierro dulce sobre un trozo de imán natural, el hierro dulce adquiere la propiedad de atraer otros trozos de hierro solamente mientras está en contacto con la piedra imán. (Ver Apéndice 2, nota 9.)
3. Si se frota un trozo de acero sobre un trozo de imán natural, el acero también atrae otros trozos de hierro, pero continúa haciéndolo aun estando separado del imán natural.

Esta fue una de las primeras observaciones «científicas» que realizaron los hombres de la antigüedad. Frotando un trozo de acero con una piedra de magnetita, el acero heredaba la cualidad de la magnetita de manera permanente. El acero se había convertido, pues, en un imán.

El hombre ya disponía de un imán fabricado por él. Dicho imán se podía obtener en las formas geométricas deseadas, ya que se partía de un trozo de hierro al que se podía dar una forma conveniente.

No obstante, la cualidad magnética era algo misterioso. Su naturaleza era algo incomprensible, y pasarían muchos siglos hasta que el hombre pudiera explicar teóricamente el mecanismo por el que el imán atrae al hierro. La única forma de que se disponía para crear imanes era frotando el hierro con la piedra de imán natural.

Entonces se pensaba que la cualidad magnética era un fluido imponderable que se transmitía del imán natural a los imanes artificiales, de la misma forma que la electricidad o el calor, que también se consideraban fluidos «misteriosos».

Primeras aplicaciones del magnetismo: la brújula

El imán era una curiosidad. Sus aplicaciones prácticas eran escasas. Hasta que alguien (casi con toda seguridad los chinos) observó que, si se colgaba un imán de modo que se quedase en equilibrio horizontalmente, siempre se orientaba en la misma dirección, de manera que uno de sus extremos señalaba aproximadamente al Norte geográfico, hacia donde permanecía señalando invariablemente.

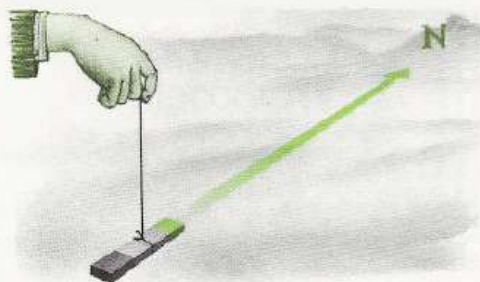
MAGNETISMO Y FISIOLOGIA

Los fisiólogos y los médicos han demostrado mucho interés en averiguar si el magnetismo podría influir de alguna manera sobre los procesos fisiológicos. Se han hecho pruebas con insectos sometidos a campos magnéticos muy intensos, y hasta ahora no se ha descubierto que los organismos resulten afectados por los campos magnéticos.

El origen del magnetismo era tan misterioso, no obstante, que su nombre se aplicó también a algunas propiedades de los organismos de carácter no menos misterioso. Se ha hablado mucho y se habla aún hoy del «magnetismo animal», que es una misteriosa cualidad de los organismos superiores, y en particular de los humanos, de producir algunos efectos comprobados que nos resultan desconocidos. Lo que sí podemos asegurar es que, aun existiendo estos mecanismos desconocidos, su naturaleza no es magnética.



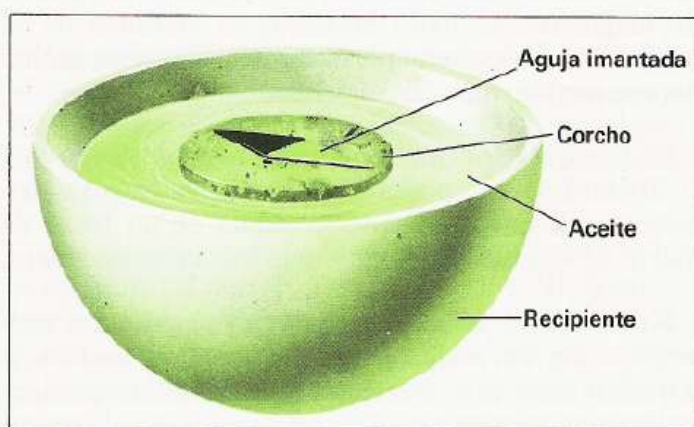
Los cuerpos magnéticos no afectan a los seres vivos.



El sistema de utilización no era cómodo, porque había que tener el imán suspendido en equilibrio.

Los navegantes y exploradores no tardaron en percatarse de esta maravillosa propiedad del imán. Así, construyeron la brújula, que es un instrumento concebido y diseñado para la navegación.

Buscando la manera de aumentar su sensibilidad, los antiguos navegantes hacían que la aguja imantada flotase, unida a un corcho, sobre un recipiente con aceite, con objeto de reducir al mínimo el rozamiento.



Otra manera de resolver el problema, mucho más indicada para el transporte, era la de apoyar el centro de la aguja en una oquedad mediante una punta muy afilada. Así, el rozamiento quedaba reducido al mínimo, y el aparato era fácil de transportar en cualquier posición, sin peligro de que el aceite se pudiese derramar.

La brújula fue, en su día, un invento absolutamente revolucionario. Hasta su aparición, el hombre tenía que limitar sus excursiones y desplazamientos hasta puntos geográficos que se pudiesen identificar visualmente.

Pero ¿cómo podían los hombres orientarse en el mar? ¿Qué accidentes geográficos podían encontrar, una vez que perdían de vista la costa?

La brújula les brindaba un nuevo elemento insustituible. Sin referencias visuales de ningún género, la aguja imantada señalaba siempre la misma dirección, y los navegantes podían mantener el mismo rumbo sin miedo a desviarse.



Esta es la forma definitiva que adquirió la brújula, y que es la que aún subsiste hoy día.

El hombre pudo así explorar cada vez más nuestro planeta. Se fueron conociendo nuevas tierras, nuevos mares y las tierras que estaban más allá de los mares.

Pero la ignorancia del hombre sobre el fundamento de la brújula seguía siendo la misma.

¿Qué otras propiedades tienen los imanes? ¿Cómo se comporta un imán cuando está en presencia de otro imán?

Si disponemos de dos imanes alargados, el extremo que señala al Norte geográfico recibe el nombre de polo norte del imán, y el que señala al Sur, polo sur. Resulta que, si acercamos un imán a otro, se atraerán si están cerca los dos polos de distinto nombre, y se repelerán si están cerca los dos polos de igual nombre.

Esta fue la primera ley observable del magnetismo, que de manera resumida se puede expresar así:

Los polos de distinto nombre se atraen, y los del mismo nombre se repelen.

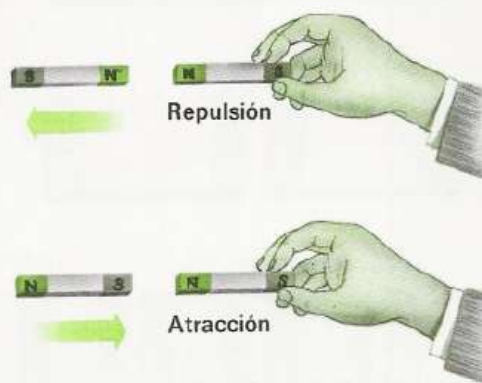
Si esta ley se cumple siempre, ¿por qué la brújula, que es un imán solo, se orienta siempre en la misma dirección?

La respuesta es que la Tierra es también un imán y la brújula está sometida a su influencia, de la misma manera que los imanes del ejemplo anterior.

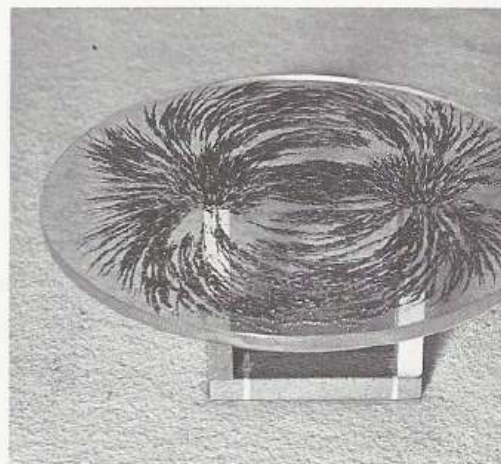
Líneas de fuerza del campo magnético

Los imanes no se atraen ni se repelen a cualquier distancia, ni la brújula señala la misma dirección si se la aleja mucho de la Tierra. Los efectos del magnetismo están limitados a una zona próxima al imán o a los imanes. Dicho en otras palabras: los efectos magnéticos solamente se perciben en el seno del campo magnético.

Campo en sentido físico es una región de espacio donde se manifiestan unas propiedades o un fenómeno. **El campo magnético es, pues, aquella región de espacio donde se manifiestan propiedades magnéticas.**



Las limaduras de hierro colocadas sobre un imán se orientan según las líneas de fuerza del campo magnético.



Al igual que en Electrostática, el campo se caracteriza por las líneas de fuerza que lo definen y que a la vez sirven para caracterizarlo gráficamente.

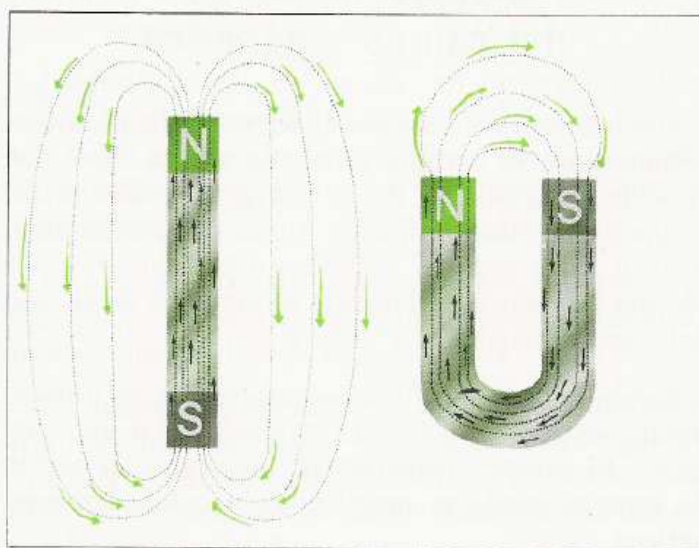
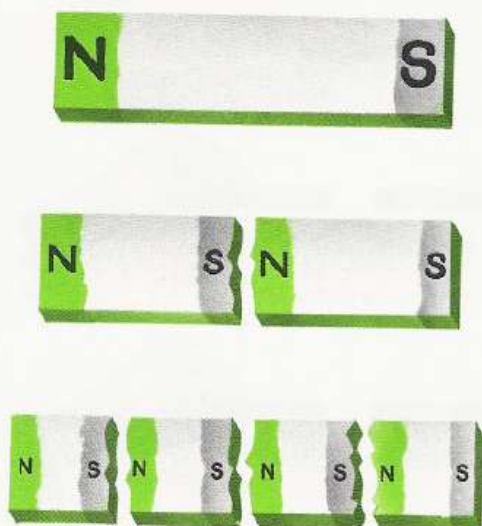
En el campo electrostático las líneas de fuerza nacían en unas cargas y morían en otras cargas. No obstante, estas cargas podían ocupar cualquier posición en el espacio, con lo que las líneas de fuerza podían adoptar una forma geométrica cualquiera.

En el campo magnético las líneas de fuerza nacen en el polo norte y mueren en el polo sur del imán, pero con una particularidad muy importante: el polo norte y el sur pertenecen al mismo imán, es decir, no pueden ocupar posiciones arbitrarias en el espacio, sino que deben estar indisolublemente unidos. Ello obedece a que no existen polos magnéticos separados (y, sin embargo, sí existen cargas eléctricas separadas).

Si dividimos un imán en dos trozos, cada uno de ellos se comporta como un imán. Si continuamos dividiendo cada trozo del imán en trozos más pequeños, cada uno de los trozos seguirá siendo un imán completo, con sus dos polos. (Ver Apéndice 2, nota 10.)

Por mucho que continuemos dividiendo el imán, nunca llegaremos a separar los polos magnéticos. Esto trae como consecuencia que:

Las líneas de fuerza del campo magnético son siempre cerradas. Nacen en el polo norte y mueren en el polo sur, pasando por dentro del imán.



LOS POLOS DE LA TIERRA

La Tierra no tiene una estructura homogénea. En ella se distinguen varias capas, con distintas composiciones, densidades y propiedades.

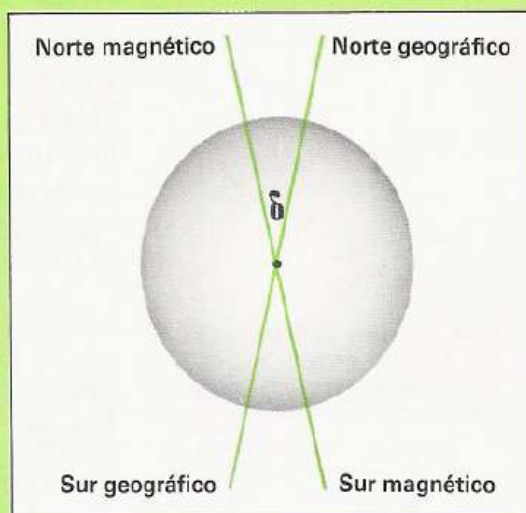
El núcleo parece ser que está compuesto de níquel y hierro fundidos, además de otros materiales no magnéticos. Precisamente el nombre de NIFE con que se designa al núcleo terrestre procede de los símbolos químicos de estos dos metales.



Como todos sabemos, la Tierra gira sobre su eje. El carácter fluido del núcleo terrestre y otras causas no muy bien conocidas hacen que el polo Norte geográfico no coincida con el respectivo polo magnético (y otro tanto ocurre con los respectivos polos Sur).

Considerando la Tierra como un cuerpo esférico, el eje de rotación coincide con la línea que une los polos Norte y Sur geográficos, que es un diámetro de la esfera.

La situación de los polos magnéticos está ligeramente desplazada con respecto al eje geográfico. El ángulo formado entre el eje geográfico y el magnético se llama **declinación** y se representa con la letra griega δ (delta).



Los polos magnéticos no permanecen quietos, sino que su posición va variando de un año a otro, por lo cual la declinación también cambia.

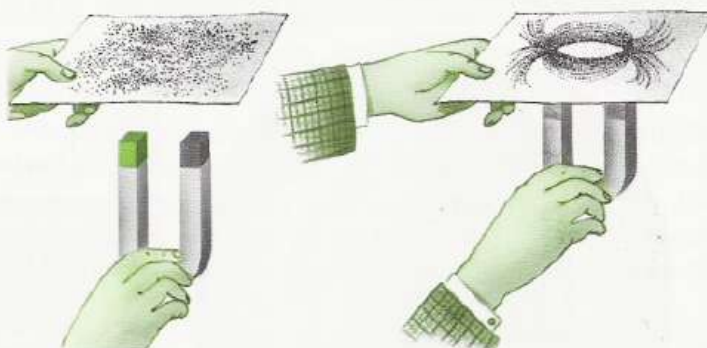
Es muy importante conocer la declinación magnética para trazar rumbos geográficos con precisión. Por ello, los mapas llevan el valor de la declinación magnética, así como la fecha en que se determinó dicho valor. (Ver Apéndice 2, nota 11.)

DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL CAMPO MAGNETICO

Las líneas de fuerza del campo magnético se pueden visualizar de una manera mucho más fácil que las del campo eléctrico.

Basándose en la propiedad que tiene el imán de atraer limaduras de hierro, se puede determinar la forma geométrica del campo del imán colocando las limaduras de hierro sobre una hoja de papel, y el imán por debajo. Dando unas ligeras sacudidas al papel, las limaduras se orientan siguiendo las líneas de fuerza del campo.

Unas limaduras de hierro sobre una cartulina se orientan según las líneas de fuerza del campo magnético de un imán.



Retirando lentamente el imán, las limaduras de hierro de la ilustración mantendrán su posición relativa, indicando la forma del campo magnético que tenía el imán.

Unos clavos de hierro o acero se orientan por efecto del campo magnético del imán colocado debajo de la mano. Al mover el imán, los clavos se mueven también.



Como hemos podido apreciar, el imán sigue actuando sobre las limaduras, aunque interpongamos un papel por medio. Con un imán de gran potencia se puede, incluso, interponer la mano, y los efectos del campo magnético se seguirán observando, aunque no percibamos ningún efecto fisiológico.

Materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos

El único efecto perceptible de un campo magnético es la atracción o repulsión de objetos de hierro dulce o de acero. Pero ¿ocurre así de verdad o es que los efectos que el campo magnético produce sobre las demás sustancias son tan débiles que no se pueden observar?

Como en otros muchos casos que aparecen en la Física, la única posibilidad de eliminar esta incertidumbre es acudir a la experimentación.

Un dispositivo experimental es el ilustrado en la figura.

Imaginemos un imán sumamente potente (de grandes dimensiones), en uno de cuyos polos hemos practicado una oquedad cilíndrica, donde puede entrar un tubo de ensayo. En el interior del tubo podemos colocar unas muestras de los materiales cuyo comportamiento queremos observar.

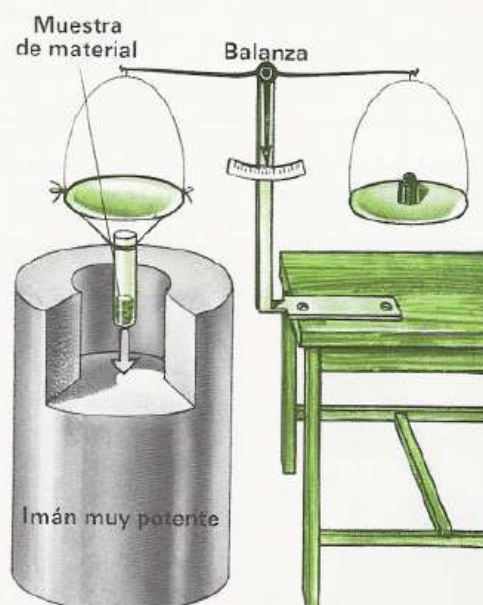
El campo magnético será sumamente intenso en el interior de esta oquedad y, cuanto más profundamente penetre el tubo de ensayo en la oquedad, tanto más fuerte será el campo.

Colocamos el tubo de ensayo en uno de los platillos de una balanza y equilibramos el platillo de la muestra poniendo pesas en el otro platillo.

De esta manera, cualquier fuerza que se pueda producir sobre la muestra se acusará en una desnivelación de la balanza. Su alejamiento de la posición de equilibrio nos dará idea cuantitativa del comportamiento de la sustancia.

Iniciamos el experimento desplazando el imán hacia abajo y equilibrando el tubo de ensayo vacío, sin muestra (de esta manera determinaremos qué parte de la fuerza que se desarrolle más tarde se deberá al material del tubo). A continuación acercamos el imán, elevándolo verticalmente, y observamos si se produce en la balanza una desviación hacia uno u otro lado.

Repetimos este proceso tantas veces como deseemos, poniendo en el tubo de ensayo la misma cantidad de diversas sustancias.



Observamos los efectos que se producen en la balanza en cada caso y obtenemos la siguiente clasificación de materiales:

- a) **Unos materiales son atraídos fuertemente hacia el imán.** Son los materiales que ya conocíamos (hierro, acero, etc.).
- b) **Otros materiales son atraídos muy débilmente hacia el imán** (como el aluminio, por ejemplo). La fuerza con que el imán los atrae es unas 100.000 veces menor que la que atrae al hierro, por lo cual el desplazamiento de la balanza es sumamente pequeño.
- c) **Finalmente, otras sustancias, como el bismuto, son repelidas por el imán,** sufriendo el tubo de ensayo una fuerza ascensional que tiende a alejar la muestra del imán. Esta fuerza es muy débil, comparable en magnitud a la de atracción del tipo b.

Cualquier material con que ensayemos de esta manera presentará uno de los tres comportamientos señalados.

Los materiales del primer tipo —comportamiento a— se llaman **ferromagnéticos**, los de comportamiento b se llaman **paramagnéticos** y los de comportamiento c, **diamagnéticos**.

De todos ellos, los de propiedades más espectaculares son los ferromagnéticos, que son, por ello, los más utilizados en aplicaciones técnicas.

Temperatura de Curie

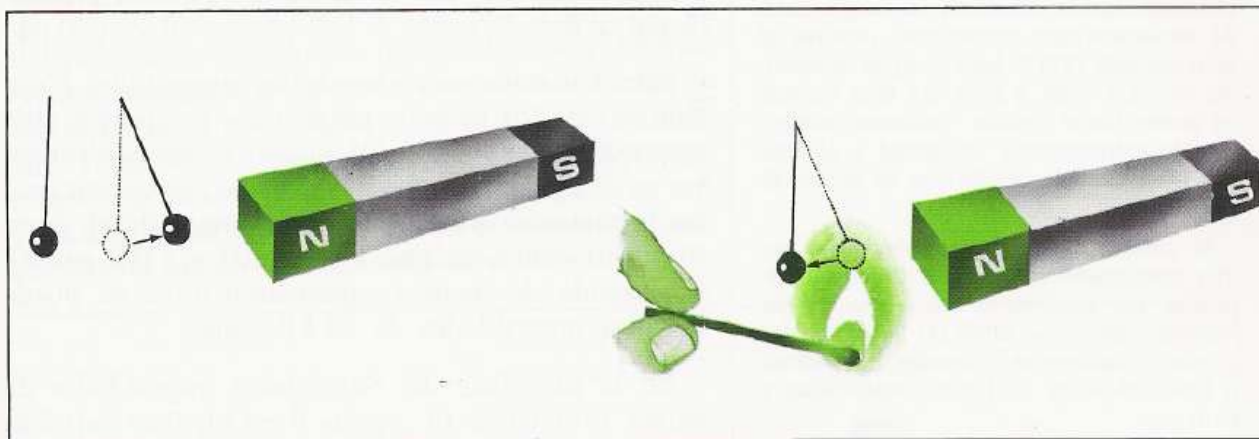
Al llegar aquí nos podemos hacer una pregunta: el carácter ferro, para o diamagnético de una sustancia ¿será invariable, o cambiará en función de algunos parámetros exteriores, tales como presión, temperatura, etc.?

Los materiales ferromagnéticos, en particular, conservan sus propiedades magnéticas únicamente por debajo de una temperatura, llamada **temperatura de Curie**, característica de cada material. Si se los calienta por encima de dicha temperatura, pierden sus propiedades ferromagnéticas y pasan a comportarse como materiales paramagnéticos.



La investigadora polaca Maria Skłodowska, más conocida por el apellido de su marido, Curie, aportó a la ciencia una importante contribución. Estudió el fenómeno del magnetismo, entre otros casos, pero su trabajo más importante fue el descubrimiento del radio y de los fundamentos de la radiactividad.

Se puede realizar un sencillo experimento para poner de manifiesto la influencia de la temperatura. Tomemos una bolita de hierro y suspendámosla de un alambre fino, formando una especie de péndulo. Si acercamos a ella un imán, sin que llegue a tocarla, se inclinará hacia el imán, desviándose de su posición vertical.



Si calentamos con una cerilla la bolita, al cabo de un rato el hierro alcanzará la temperatura de Curie y se volverá a colocar verticalmente la bolita, al desaparecer la fuerza atractiva entre ella y el imán. La bolita de hierro se mantendrá en esta posición en tanto que su temperatura se mantenga por encima de la temperatura de Curie.

Una bola de hierro suspendida de un hilo es atraída por un imán. Al calentar la bola, su temperatura puede alcanzar el punto de Curie, separándose del imán.

Al cabo de un cierto tiempo la bolita de hierro se enfriará. Su temperatura descenderá por debajo de la temperatura de Curie y volverá a recuperar sus cualidades ferromagnéticas, quedando nuevamente desviada al ser atraída otra vez por el imán.

Intensidad del campo magnético

La acción de un imán se manifiesta a lo largo de las líneas de fuerza que determinan la configuración del campo magnético. Todo imán posee dos polos magnéticos; luego el campo dependerá, en cierto modo, de la posición del imán. Ello nos dice que el campo magnético es una **magnitud vectorial**. Para determinar, pues, un campo magnético, no bastará con medir su magnitud o intensidad, sino que habrá que determinar su dirección y sentido (lo mismo que nos ocurría con el campo eléctrico $\vec{E}$).

SUPERCONDUCTIVIDAD E IMANES

La superconductividad es la propiedad que tienen los metales de disminuir su resistencia cuando desciende su temperatura. Al alcanzarse una temperatura próxima al cero absoluto (273°C bajo cero), la resistencia se hace igual a cero. De esta manera se puede hacer circular corrientes eléctricas de extraordinaria intensidad y obtener con ellas campos magnéticos de potencias elevadísimas.

El proceso de la superconductividad es muy complicado. La consecución de temperaturas tan sumamente bajas requiere un material costoso y difícil (el helio líquido) y unas instalaciones (llamadas criogénicas o productoras de frío) muy complicadas y carísimas.

Las aplicaciones industriales de la superconductividad podrían ser importantísimas, pero la complejidad de los sistemas e instalaciones necesarios hacen que, de momento, la superconductividad sólo tenga aplicación en los laboratorios de investigación científica.

Es costumbre representar al **vector intensidad del campo magnético** con la letra B , aunque en algunos libros se le denomina **vector inducción magnética**. Su módulo se mide en **gauss**, que es una unidad así llamada en homenaje a un físico alemán cuyo nombre era Gauss y que fue autor del teorema que lleva su nombre (que ya vimos en Electrostática). También se le designa por $\vec{H}$, que es otro vector proporcional a $\vec{B}$.

Para hacernos una idea de las magnitudes cuantitativas de los campos magnéticos corrientes, diremos que la intensidad del campo magnético terrestre es de aproximadamente 0,5 gauss, y que con imanes grandes se pueden alcanzar unos 10.000 gauss (ó 10 kilogauss, ya que $1 \text{ kilogauss} = 1.000 \text{ gauss}$). Con ayuda de imanes superconductores se puede llegar a intensidades de 80 kilogauss.

En la superficie del Sol existen intensidades de varios centenares de gauss, y en algunas estrellas se encuentran intensidades de varios miles de gauss.

La determinación de la magnitud de un campo magnético $\vec{B}$ se hace de manera indirecta, al igual que la del campo eléctrico $\vec{E}$. Para ello es necesario medir la fuerza que ejerce el campo magnético sobre una masa determinada de material ferromagnético (algo parecido al experimento de la balanza que vimos anteriormente).

Con todo lo dicho, ya podemos representar un imán por su vector intensidad magnética equivalente. Dibujaremos un vector dirigido del polo sur al polo norte, cuya longitud será directamente proporcional a la intensidad del campo magnético en ese punto, si el imán es recto.

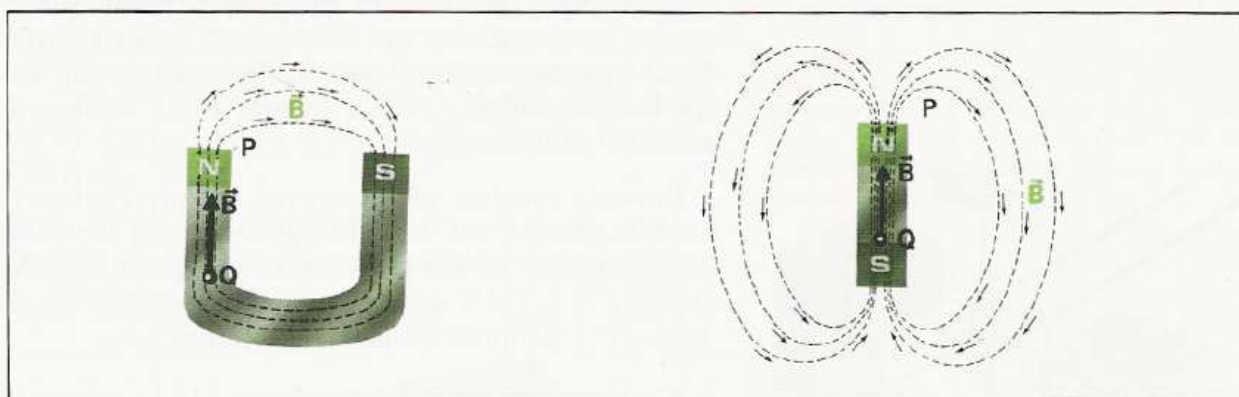


Si el imán es en forma de herradura, el vector deberá ir en sentido contrario. ¿Por qué?

El vector $\vec{B}$ es en cada punto tangente a las líneas de fuerza del campo.

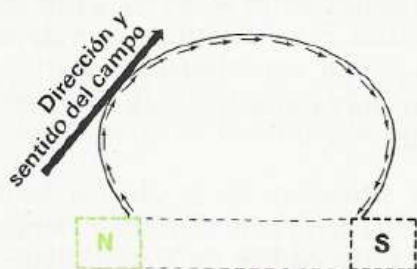
Si dibujamos ampliados los imanes, veremos que las líneas de fuerza del campo son cerradas y que nacen en el polo norte y mueren en el polo sur.

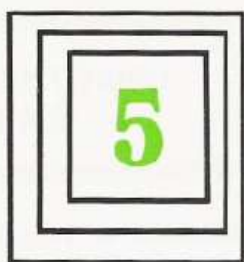
En cualquiera de los dos casos, por ejemplo, en el punto P del imán en herradura o del imán recto, el campo $\vec{B}$ es tangente a la línea de fuerza del campo, y va dirigido en el mismo sentido de la línea de fuerza, que ya sabemos que, por definición, va del polo norte al polo sur. Esa es la razón del aparente contrasentido de que en un caso el vector se dirija hacia el polo norte, y en otro hacia el polo sur. Tengamos en cuenta que las líneas del campo magnético son cerradas y que precisamente se cierran dentro del imán. Por eso, en el punto Q, el vector llevará las direcciones señaladas.



Para resolver cualquier posible duda basta recordar que el campo magnético es siempre tangente a las líneas de fuerza, y su sentido es el que llevan dichas líneas.

En cuanto a la superposición de varios campos magnéticos, es totalmente aplicable lo dicho para los campos eléctricos. Los vectores de cada campo magnético se representan gráficamente, y su suma vectorial se determina hallando la diagonal del paralelogramo formado. Dicho vector diagonal es la representación gráfica del campo resultante.





INTERACCIONES ELECTRICIDAD- MAGNETISMO

Influencia entre corrientes e imanes: experimento de Oersted

Con lo que hemos visto hasta aquí parece que el campo magnético es una curiosidad de la Naturaleza. Apparentemente no existe ninguna relación entre las propiedades de los imanes y las de las corrientes eléctricas.

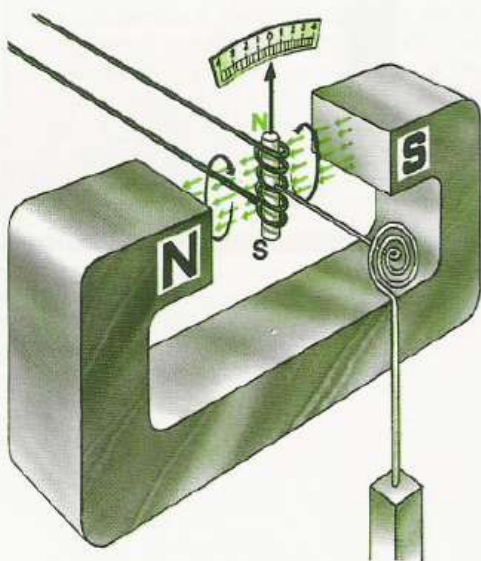
Durante muchos años ocurrió así precisamente. La Electricidad era una disciplina que se ocupaba esencialmente de los fenómenos electrostáticos. Ni siquiera el estudio de las corrientes eléctricas encajaba en el dominio de la Electroestática.

El descubrimiento de los efectos de la corriente eléctrica sobre las contracciones musculares de un anca de rana, realizados por Galvani, dio lugar a estudios más profundos realizados por Volta.

El panorama disciplinar era, pues, el de tres ramas de la Física que parecían ser absolutamente independientes entre sí. La Electricidad estudiaba los fenómenos electrostáticos, el Galvanismo se ocupaba de las corrientes eléctricas, y el Magnetismo de las propiedades del «fluido magnético» y de sus aplicaciones a la brújula.

No parecía existir relación alguna que ligase todos estos fenómenos entre sí. Parecía que estas tres ramas de la Física eran capítulos completos por sí mismos, y que todo conocimiento relativo a ellos debería quedar forzosamente englobado en una de estas disciplinas.

Esta era la situación de la ciencia hasta 1820, fecha en que el físico Hans Christian Oersted, catedrático de la Universidad de Copenhague, realizó



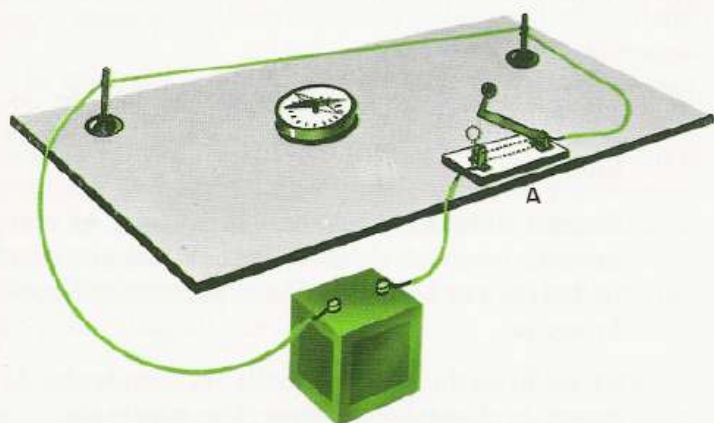
Los aparatos eléctricos de medida son una aplicación de interacción entre corrientes e imanes.

un experimento que llegó a cambiar totalmente el panorama de la Física y sirvió para descubrir el eslabón que une ciertos fenómenos de tipo eléctrico con otros de tipo magnético.

Se dice muchas veces que los descubrimientos importantes suelen ser obra de la casualidad. Esto se dice, en particular, del experimento de Oersted. Pero, para que surja un descubrimiento, deben existir al menos dos factores esenciales. Por una parte, debe existir curiosidad para que alguien disponga del tiempo y de la motivación necesarios para realizar el experimento, y, por otra parte, ese alguien debe ser capaz de captar e interpretar el fenómeno observado.

No fue, por tanto, puramente casual el que Oersted probase a hacer pasar una corriente eléctrica cerca de una brújula y observase que ésta se movía. Probablemente Oersted estaba convencido de que debía existir necesariamente alguna relación entre el magnetismo y la circulación de una corriente eléctrica.

El dispositivo experimental que le permitió a Oersted realizar tan importante descubrimiento era el siguiente:



Sobre una mesa colocaba un conductor recto, por el que podía hacer pasar la corriente procedente de una batería.

Paralelamente al conductor colocaba una brújula que señalaba, como es habitual, la dirección Norte-Sur.

Nada ocurría mientras que no se cerrase el circuito y circulase corriente por el conductor.

UN EXPERIMENTO SIMILAR AL DE OERSTED

Podemos repetir el experimento de Oersted, si disponemos de una brújula pequeña.

Para que la desviación de la aguja imantada sea apreciable es necesario que la corriente que circule por el conductor sea de gran intensidad. No es fácil obtenerla con pilas ni con los elementos normales de que se dispone en la casa o en el colegio.

Los automóviles tienen una batería que puede proporcionar corrientes de gran intensidad (del orden de los 100 amperios en el momento del arranque).

Levantando el capó del coche podemos ver que de la batería parten dos cables muy gruesos (eso se debe a que dichos cables deben presentar una resistencia muy pequeña para que por ellos circulen corrientes de gran intensidad).

Colocando la brújula cerca de uno de esos cables, si alguien acciona el contacto para arrancar el motor, podemos observar la desviación de la aguja de la brújula en el momento de cerrar el circuito.

Si repetimos la experiencia colocando la brújula cerca del otro cable, veremos que la desviación de la aguja es opuesta a la que presentaba antes.



Hans Christian Oersted, gracias a cuya contribución el magnetismo y la electricidad alcanzaron rango de ciencia única.

Al cerrar el interruptor A, pasaba la corriente y la aguja se desviaba de su posición inicial y marcaba otra dirección distinta. La aguja imantada continuaba señalando esta nueva dirección en tanto que circulase la corriente eléctrica.

Si se abría el interruptor, dejaba de circular la corriente y la aguja volvía a señalar la dirección original.

Estaba claro, pues, que aparecía un campo magnético asociado al paso de una corriente eléctrica. De esta manera quedaba establecido un vínculo que relacionaba de manera permanente las dos ramas de la Física, que hasta entonces estaban separadas entre sí.

¡Qué gran día aquel del invierno de 1820! Esa fecha fue una de las que hacen que cambie la Historia. Gracias al descubrimiento «casual» de Oersted, se contemplaban los fenómenos eléctricos desde un punto de vista nuevo y prometedor. Ello permitió que surgieran gran cantidad de investigadores que realizasen nuevos descubrimientos. Así se creó una mentalidad nueva que, en gran medida, ha configurado el método científico de nuestros días.

Pero estudiemos con más detenimiento el experimento de Oersted y deduzcamos las mismas consecuencias que él extrajo:

Cuanto más grande era la intensidad de corriente, mayor era la desviación de la aguja imantada.

Cuanto más cerca estaban la aguja y el conductor, para un valor de intensidad constante, mayor era la desviación experimentada por la aguja.

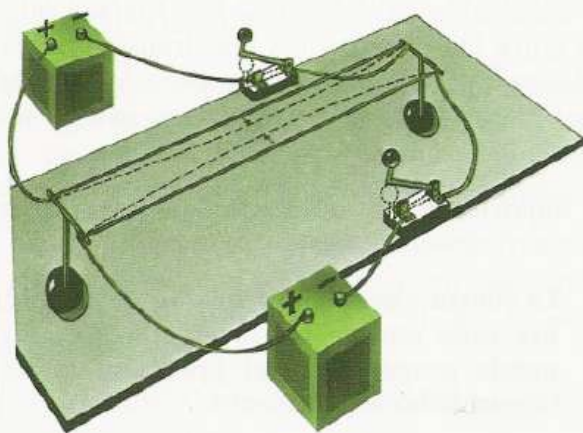
Si se invertía el sentido de la corriente, la aguja se desviaba en dirección contraria.

La primera consecuencia que podemos deducir es que el magnetismo ya no es aquel «fluido» misterioso que se podía adquirir frotando un trozo de hierro con un determinado mineral.

El campo magnético es algo inseparable y sustancial con la corriente eléctrica. Podemos crear a nuestra voluntad un campo magnético sin más que hacer pasar una corriente eléctrica por un lugar determinado.

Para los efectos del campo magnético, pues, es equivalente considerar un imán o una corriente eléctrica. ¿Ocurrirán también fenómenos de atracción y de repulsión entre corrientes eléctricas?

Sí, sin duda. Podríamos realizar el siguiente experimento:

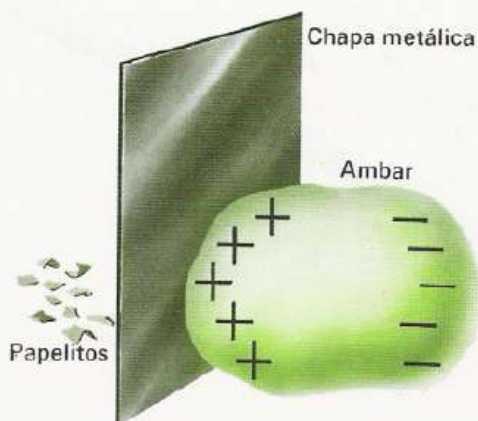


Disponemos dos conductores paralelos y próximos entre sí. Si unimos los extremos de cada uno a una batería de gran carga, de manera que por ellos circulen corrientes en el mismo sentido, veremos que se produce una fuerza que tiende a juntar los dos conductores.

Si invertimos el sentido de una de las corrientes, los conductores se separarán entre sí. En el primer caso se ha producido una fuerza de atracción y en el segundo una fuerza de repulsión. Se ha vuelto a repetir un resultado análogo al obtenido acercando un imán a otro. En este caso hablamos de sentido de circulación de la corriente, y en aquél hablábamos de polos magnéticos.

Todavía nos puede caber una duda. Al ser de naturaleza eléctrica el fenómeno, ¿no será que la fuerza desarrollada se debe a causas electrostáticas, las mismas que hacían que un trozo de ámbar electrizado atrajese papelitos?

Esta duda la podemos disipar fácilmente. Si fro-tamos un trozo de ámbar y lo acercamos a unos pequeños papelitos interponiendo una fina lámina metálica, veremos que ya no ocurre ninguna atracción. La chapa metálica actúa como una pantalla que impide que el campo eléctrico se manifieste a su través.



LEY DE AMPERE

El físico francés Ampère, colocando dos conductores paralelos recorridos por una corriente, dedujo por vía experimental la fórmula matemática que permite calcular la magnitud y dirección de la fuerza producida en función de las intensidades de las corrientes.

También fue él quien dedujo la regla de la mano derecha para determinar el sentido de la desviación en función de la dirección de la corriente.

Si repetimos la experiencia de los dos conductores, interponiendo una lámina metálica entre ellos, seguirán manifestándose los efectos de atracción y repulsión. El campo magnético atraviesa el material de la chapa metálica (siempre que no sea de hierro), al igual que lo hacía el imán a través del papel o de nuestra propia mano.

La conclusión es definitiva. Las fuerzas que aparecen entre los conductores que transportan las corrientes son de naturaleza magnética, y en cada uno de los conductores se establece un campo magnético.

Es importante que obtengamos consecuencias de este experimento. Aquí están:

La fuerza ejercida por unidad de longitud sobre cada uno de los conductores es directamente proporcional al producto de las dos intensidades de corriente.

Esta fuerza es inversamente proporcional a la distancia entre los conductores (es decir, cuanto más próximos estén entre sí, mayor será la fuerza).

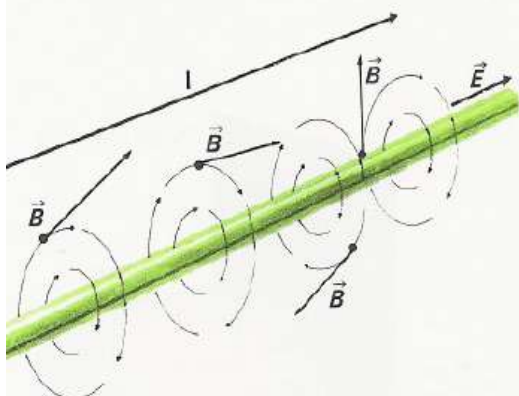
Campo magnético creado por un conductor

¿Cómo será geoméricamente el campo magnético producido por una corriente eléctrica?

Ya sabemos que las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas. En el caso de una corriente, no existen polos magnéticos; luego no nacen ni mueren en ningún lugar geométrico definido.

Por otra parte, la fuerza que se desarrolla entre dos conductores que transportan dos corrientes es directamente proporcional a la longitud de esos conductores. Un trozo de conductor es igual que otro trozo de conductor. Las líneas de fuerza deberán ser iguales en cualquier tramo del conductor.

Por todo ello no puede haber más que una posibilidad: las líneas de fuerza del campo magnético deberán ser circulares, y el conductor deberá pasar por su centro.



De aquí deducimos una consecuencia muy importante:

El campo $\vec{B}$ magnético es siempre perpendicular al campo $\vec{E}$ eléctrico.

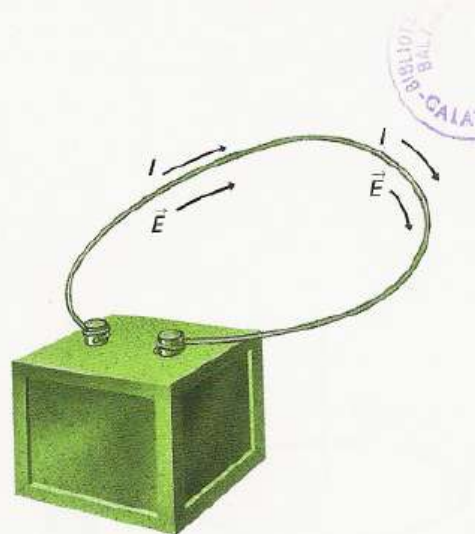
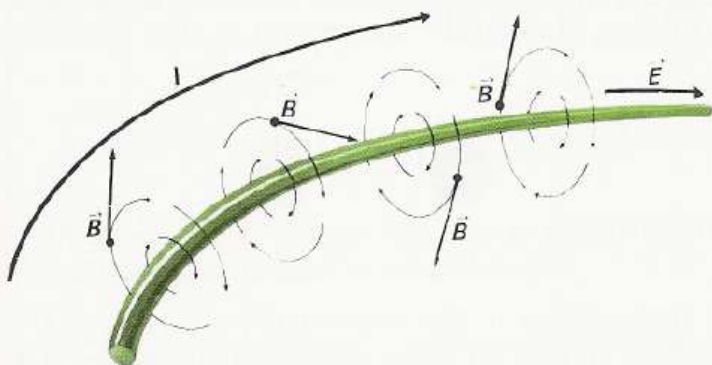
Los planos que contienen a las líneas de fuerza del campo magnético son perpendiculares al conductor, y el campo eléctrico lleva precisamente la dirección del conductor.

En cualquier punto de un conductor los electrones se mueven en la dirección del campo eléctrico. Como no pueden salir del seno del conductor, forzosamente tienen que ser paralelos a los vectores $\vec{E}$ en cada punto.

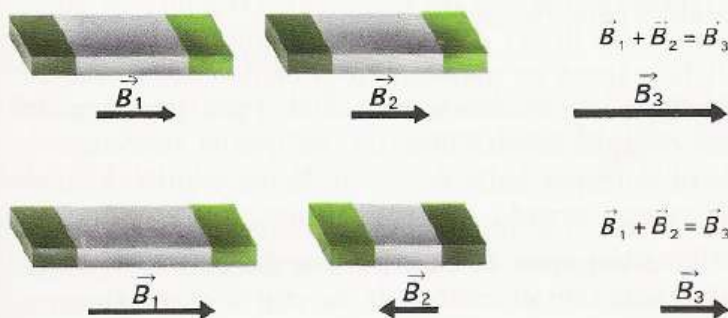
Conclusión: el campo eléctrico en un conductor determina siempre la dirección en que se desplaza la corriente eléctrica.

Si el conductor no es recto, todo lo anterior sigue siendo válido; es decir:

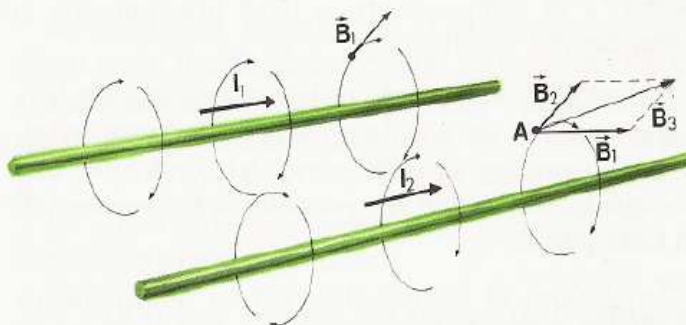
El campo magnético es siempre perpendicular al campo eléctrico en cada punto, independientemente de la forma que tenga el conductor.



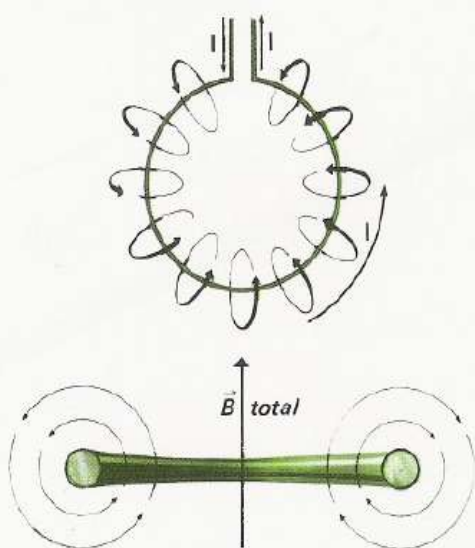
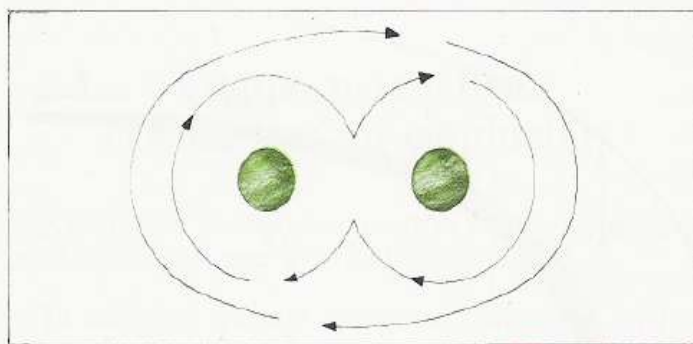
Ya sabemos que los vectores se componen vectorialmente. Los campos magnéticos son vectores. Volvamos al caso de los imanes.



Análogamente, si tenemos dos hilos conductores recorridos por dos corrientes I_1 e I_2 , el campo magnético en el punto A será un vector suma de otros dos, el vector del campo $\vec{B}_1$ debido a la corriente I_1 , y el del campo $\vec{B}_2$ debido a la corriente I_2 . La suma de ambos vectores será el vector $\vec{B}_3$.



En cada punto, pues, el campo será la suma vectorial de cada uno de los campos. ¿Y las líneas de fuerza, cómo son ahora? Son las envolventes de los conductores. Si dibujamos los dos conductores en sección, las líneas de fuerza ya no son circunferencias, sino que toman forma más o menos elíptica.



Campo creado por una espira

¿Qué ocurre con un conductor circular? Si observamos las líneas de fuerza del campo, veremos que dicho campo es máximo en el centro del conductor circular. Un conductor circular (que nunca podrá ser completamente circular, ya que la corriente deberá entrar y salir de él) se llama **espira**. Veamos el campo creado por una espira.

Si dibujamos la espira vista de perfil, el campo magnético en el centro de la espira es máximo.

Ya podemos establecer una correspondencia entre una espira y un imán. **Una cara de la espira actuará como un polo magnético, y la otra cara como el otro polo.**

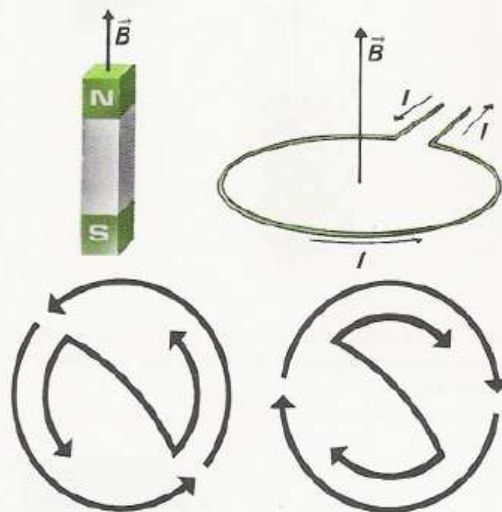
Hay una sencilla regla mnemotécnica para recordar cuál es la cara de la espira que equivale a cada polo magnético.

Dibujamos la espira con el sentido que lleva en ella la corriente que la recorre.

En una de las caras podremos dibujar una N y en la otra una S, de manera que las puntas de ambas letras apunten en el mismo sentido que la de circulación de la corriente. Esas caras corresponden a los polos magnéticos norte y sur, respectivamente.

Para una misma intensidad de corriente el campo magnético será mayor cuanto más pequeña sea la espira, es decir, cuanto menor sea su diámetro. Además, el campo será más intenso cuando la corriente que recorre la espira sea mayor.

En la práctica se utilizan muchas espiras juntas, de manera que su eje sea común. Así se consiguen valores elevados del campo magnético $\vec{B}$ sin necesidad de utilizar intensidades demasiado grandes.



Solenoides

Un conjunto de espiras dispuestas paralelamente constituye una bobina o un solenoide.

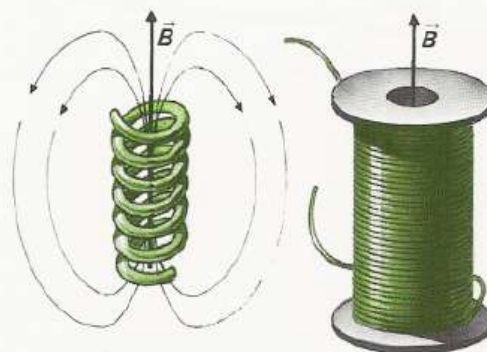
Un solenoide puede tener una o varias capas de hilo conductor arrolladas sobre un carrete aislante.

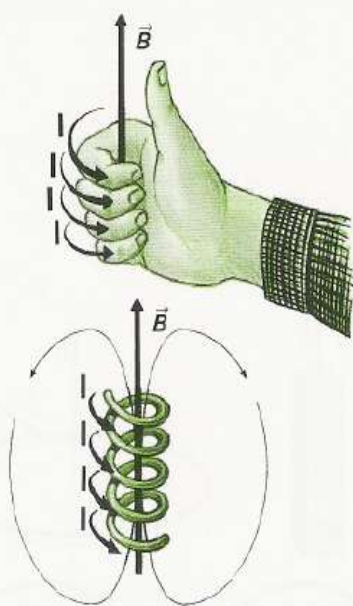
El hilo conductor suele ser de cobre recubierto de un barniz aislante.

El campo magnético producido por un solenoide está constituido por la suma de los campos parciales producidos por cada espira.

Como las líneas de fuerza se solapan, al estar las espiras muy próximas, el campo lleva la dirección del eje del cilindro donde está arrollado el hilo.

¿Cuál es el sentido en que apuntará el vector del campo $\vec{B}$? Recordemos el caso de una espira. Dependerá del sentido en que circule la corriente.





Regla de la mano derecha para deducir el sentido del campo magnético B creado por corrientes circulares.

Podemos aplicar la regla de la mano derecha. Para ello estiramos el dedo pulgar y plegamos todos los demás dedos. Los dedos pequeños indican el sentido de la corriente en las espiras, desde la mano hacia las puntas de los dedos, y el dedo pulgar nos indicará la dirección del campo.

Por último hay que señalar que, si invertimos el sentido de la corriente, cambia también el sentido del vector $\vec{B}$ (ocurre lo mismo que si damos la vuelta a la mano y la colocamos de manera que el pulgar apunte hacia abajo).

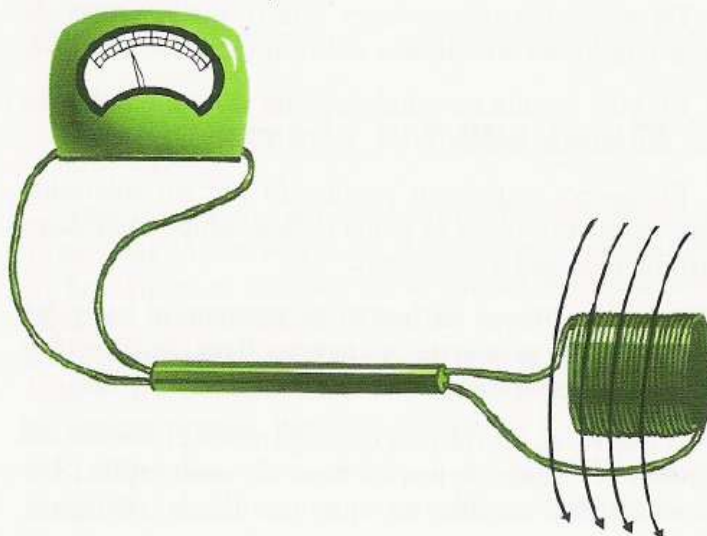
Flujo magnético. Descubrimiento de Faraday

Ya sabemos que un vector se puede asimilar a una corriente de agua.

Cuando estudiábamos el campo eléctrico hablábamos de su flujo. Si el campo magnético es también un vector, es evidente que también podemos hablar de flujo del vector campo magnético.

Después del valiosísimo descubrimiento de Oersted, las observaciones experimentales sobre los fenómenos eléctricos proliferaron mucho. El interés en descubrir nuevos aspectos de la electricidad y del magnetismo alcanzó niveles muy elevados.

El fluxómetro es un montaje que permite medir el flujo del vector campo magnético. Consiste en una bobina que se introduce en el campo a medir. La corriente inducida en ella se lleva a un aparato de medida graduado en unidades de flujo.

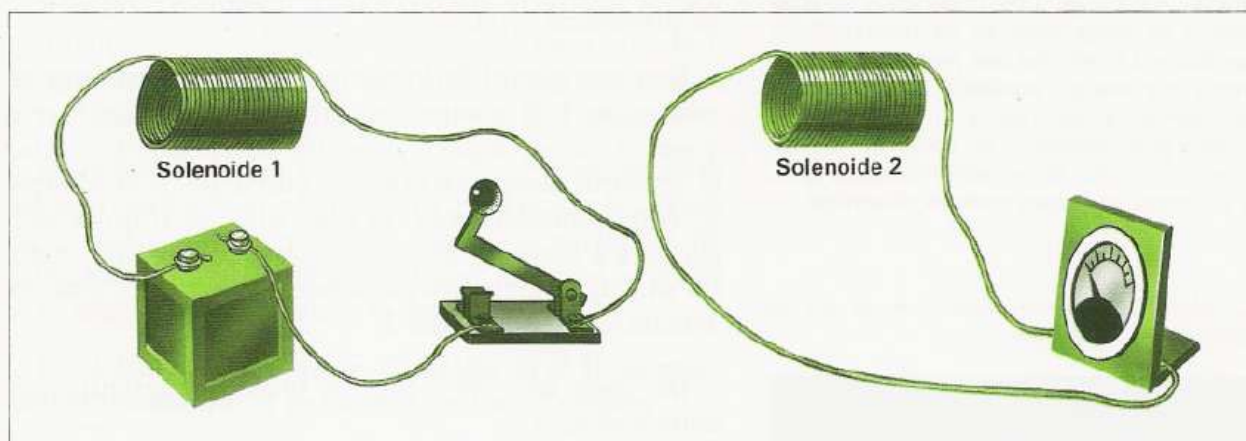


En el año 1831, Michael Faraday estaba muy interesado en observar cómo se podría transmitir la corriente eléctrica de un circuito a otro sin que estuviesen unidos eléctricamente. Entre otros muchos ensayos, realizó el siguiente:

Preparó dos solenoides con muchas espiras de hilo. Los colocó uno cerca de otro, pero sin que llegaran a tocarse.

Uno de los solenoides lo unió a una batería a través de un interruptor, de manera que, al cerrarse el interruptor, pasase una corriente por el solenoide (el solenoide 1 de nuestra figura).

El otro solenoide lo unió a un galvanómetro, que es un instrumento muy sensible y se emplea para medir intensidades de corriente muy débiles. (Un galvanómetro es un amperímetro muy sensible que puede medir fracciones de miliamperio, o de milésima de amperio.)



Faraday esperaba que, al cerrarse el circuito y pasar la corriente por el solenoide 1, el campo creado por este solenoide produciría a distancia (induciría) otra corriente en el solenoide 2.

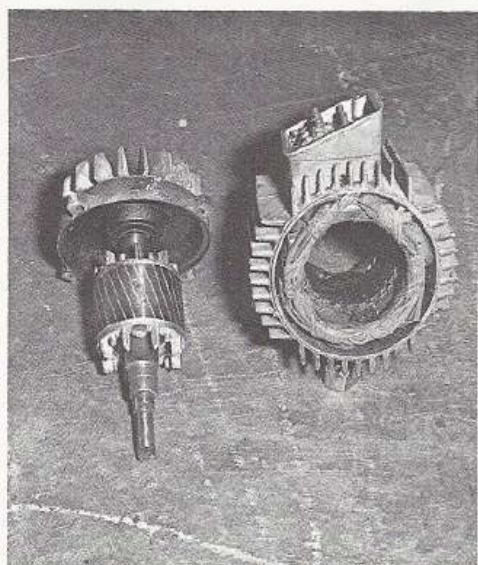
Al cerrar el interruptor la corriente recorría el solenoide 1, pero, por más que Faraday observaba el galvanómetro, por el solenoide 2 no circulaba ninguna corriente.

Faraday volvió a repetir varias veces la experiencia, abriendo y cerrando el interruptor. Una de las veces observó una ligera indicación del galvanómetro al cerrar el circuito. También observó que el galvanómetro indicaba el paso de una débil corriente al abrir el circuito.

FUNDAMENTO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS

Precisamente en el efecto de las corrientes inducidas se basan las máquinas eléctricas, motores, dinamos y alternadores. Todos ellos constan de una o varias bobinas y de una pieza dotada de un campo magnético (que puede ser un imán o uno o varios solenoides) que se mueve con respecto a las bobinas de manera que el flujo inducido en ellos varíe al girar la otra pieza. También se puede obtener el mismo resultado realizando el mismo proceso a la inversa, es decir, haciendo girar las bobinas y dejando quieto el imán. En cualquier caso, la parte giratoria se llama **rotor** y la parte fija **estator**. Con estos elementos y sus variaciones posibles existe una gran variedad de máquinas eléctricas. Una importante característica de todas ellas es su reversibilidad, es decir, la propiedad que presentan de convertir una energía mecánica de rotación en una corriente eléctrica, y en este caso se llaman generadores, o de convertir una corriente eléctrica en un movimiento de giro, y entonces se llaman motores eléctricos.

Despiece de un motor eléctrico en el que se aprecian rotor y estator.



¡Por fin encontraba algo, aunque no era precisamente lo que estaba buscando!

¿Cuál podía ser la causa de que no se indujese ninguna corriente en el solenoide 2, aunque estuviese circulando una corriente por el solenoide 1?

¿Por qué, sin embargo, se inducía una pequeña corriente en el solenoide 2 solamente al abrir o cerrar el circuito?

La respuesta es que, al cerrar el interruptor, circula una corriente que produce un campo $\vec{B}$. Las líneas de fuerza del campo $\vec{B}$ cortan la superficie del solenoide 2 (es decir, existe un flujo magnético que atraviesa al solenoide 2).

En el momento de cerrarse el interruptor, el flujo pasa de tener un valor nulo (ya que no existe corriente y, por tanto, tampoco existe campo magnético) hasta un cierto valor Φ (el flujo magnético se representa corrientemente con la letra griega Φ , que se pronuncia «fi»).

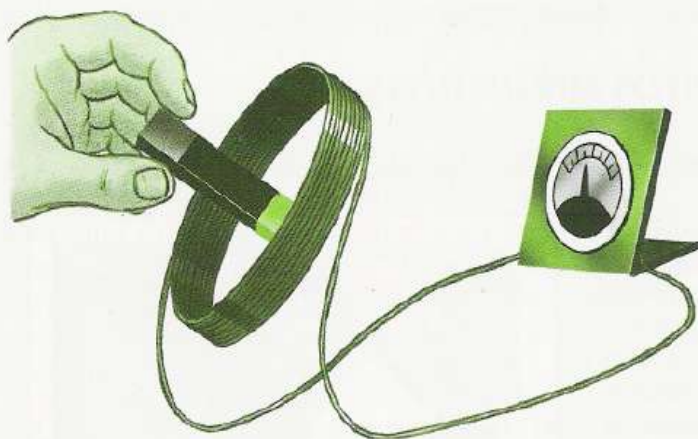
Una vez que el flujo alcanza su valor máximo, al solenoide 2 le cortan las mismas líneas de fuerza y en él no se induce ninguna corriente. Al cortar el circuito desaparecerán la corriente y el campo, y, como consecuencia de todo ello, el flujo Φ descenderá a cero. En ese momento precisamente, cuando el flujo magnético se anule, se inducirá una corriente en el solenoide 2.

De todo esto se deducen unas importantísimas consecuencias:

La variación del flujo magnético determina que se induzcan corrientes en un circuito cortado por las líneas de fuerza del campo magnético.

La intensidad de la corriente inducida, es decir, la determinada por la variación del campo magnético, es independiente de la magnitud del campo magnético.

Este descubrimiento nos abre nuevas posibilidades. Si, como hemos visto, un imán equivale a un solenoide recorrido por una corriente, ello quiere decir que podemos sustituir el solenoide 1 y su correspondiente batería por un imán, obteniéndose los mismos efectos.

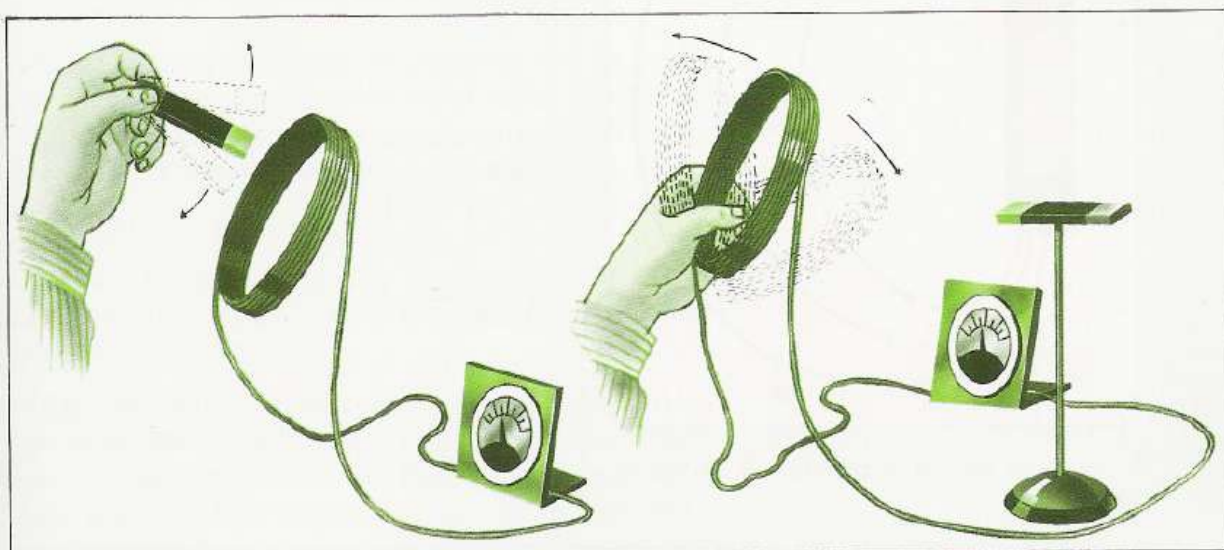


Efectivamente: al acercar un imán a una bobina o solenoide, o al alejarlo, en el solenoide se inducirá una corriente que durará tanto como dure la variación del flujo magnético que la corta, es decir, el movimiento del imán.

Idéntico resultado obtendremos dejando quieto el imán y moviendo el solenoide. Al fin y al cabo, lo que importa es la variación del flujo magnético, y no importa el procedimiento por el que éste varíe.

El movimiento no tiene por qué ser precisamente de acercamiento o alejamiento relativo entre bobina e imán. También puede obtenerse variación de flujo haciendo girar la bobina con respecto al imán o el imán con respecto a la bobina.

En definitiva: **cualquier variación en el flujo magnético producirá la inducción de una corriente.**

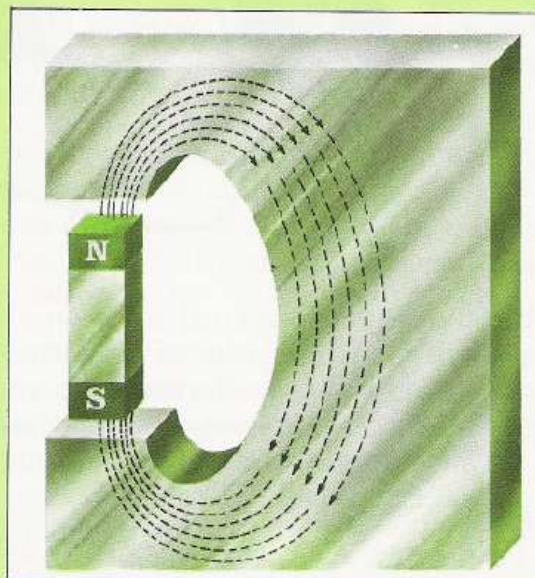


CIRCUITOS MAGNETICOS

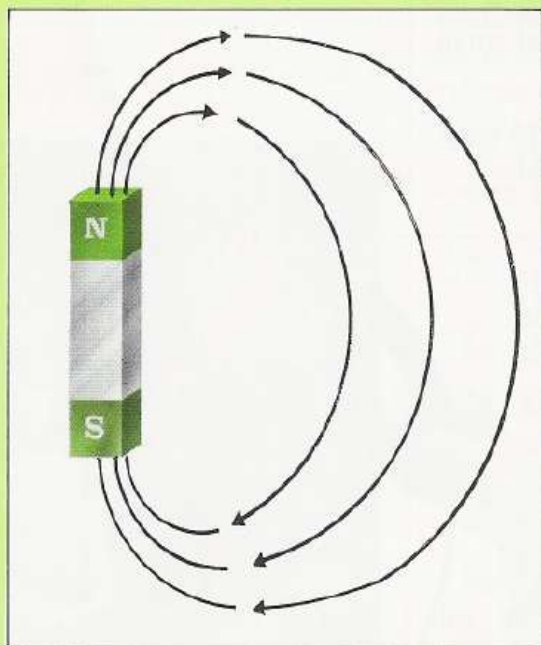
Las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas. Todas ellas nacen y mueren en los polos de un imán o en los extremos de una bobina. No obstante, la forma geométrica de su trayectoria depende del material que tengan que atravesar. Hay materiales que presentan una elevada resistencia al paso de las líneas de fuerza, mientras que otros tienen la propiedad de facilitar extraordinariamente el paso de dichas líneas. Estos materiales, llamados ferromagnéticos, se dice que presentan una alta permeabilidad magnética.

La cualidad de presentar mayor o menor resistencia al flujo magnético se denomina **reluctancia** (por consiguiente, los materiales ferromagnéticos tienen una baja reluctancia).

El recorrido de las líneas de fuerza del campo magnético se denomina **circuito magnético**.



El flujo Φ es muy elevado (la reluctancia R del circuito es baja).



El flujo Φ es pequeño (la reluctancia R del circuito es muy alta).

En un circuito magnético se puede expresar la relación entre el flujo magnético Φ , la reluctancia R y la «potencia» del imán o del solenoide (llamada fuerza magnetomotriz M) por una relación que guarda un gran parecido con la ley de Ohm de los circuitos eléctricos, y que es la siguiente:

$$M = \Phi \cdot R$$

que se denomina a veces **ley de Ohm magnética**.

Experimento de Rowland

Pero, recordando el mecanismo por el que se establece la corriente eléctrica, nos puede caber una duda razonable: ¿lo que equivale a un imán es la corriente que recorre un conductor o solamente el desplazamiento de cargas? Es decir, ¿pueden las cargas eléctricas por sí mismas determinar la aparición de un campo magnético, o es necesario que estas cargas recorran un conductor?

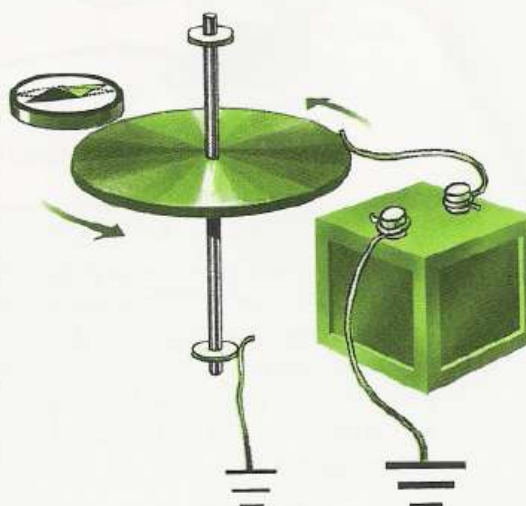
Casi podemos asegurar que sí, pero hace un siglo la cosa no estaba tan clara. Por eso, un físico americano llamado Rowland se propuso realizar un experimento que demostrase si las cargas podían determinar la aparición de un campo magnético por sí solas. Este experimento se realizó en el año 1878 (apenas hace un siglo) y consistió en lo que describimos a continuación.

Se hacía girar un disco de material aislante alrededor de un eje vertical. Al disco se le comunicaba la carga eléctrica procedente de una batería, mediante un electrodo muy próximo al borde del disco. El disco arrastraría las cargas depositadas por el electrodo en su movimiento circular, lo cual debería ser equivalente a una pequeña corriente eléctrica que recorriese una espira de diámetro igual al del disco.

Horizontalmente, y próxima al disco, se colocaba una aguja imantada. Haciendo girar el disco se observaba si aparecía alguna desviación en la aguja imantada.

Teóricamente, el campo magnético que se podía esperar era extremadamente débil, unas 100.000 veces más pequeño que el campo magnético terrestre. Esto era un desafío para los medios técnicos de entonces (y casi para los de hoy), pero Rowland fue capaz de detectar la desviación de la aguja y, por lo tanto, de demostrar que los responsables de la aparición del campo magnético son las cargas eléctricas que se desplazan.

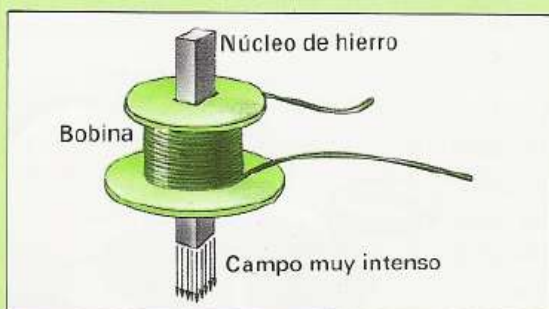
Esta relación entre cargas en movimiento y campos se ha visto ampliamente corroborada por observaciones astronómicas (ver Apéndice 2, nota 12) y tiene gran cantidad de aplicaciones en los aceleradores de partículas atómicas (ver Apéndice 2, nota 13).



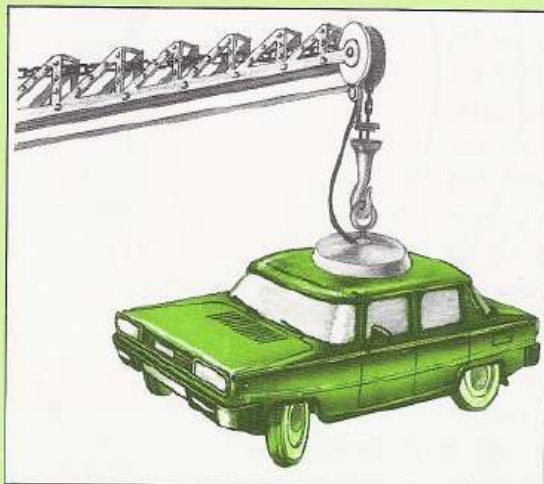
ELECTROIMANES Y RELES

Basándonos en la elevada permeabilidad de los materiales ferromagnéticos se puede incrementar notablemente la fuerza atractiva de una bobina.

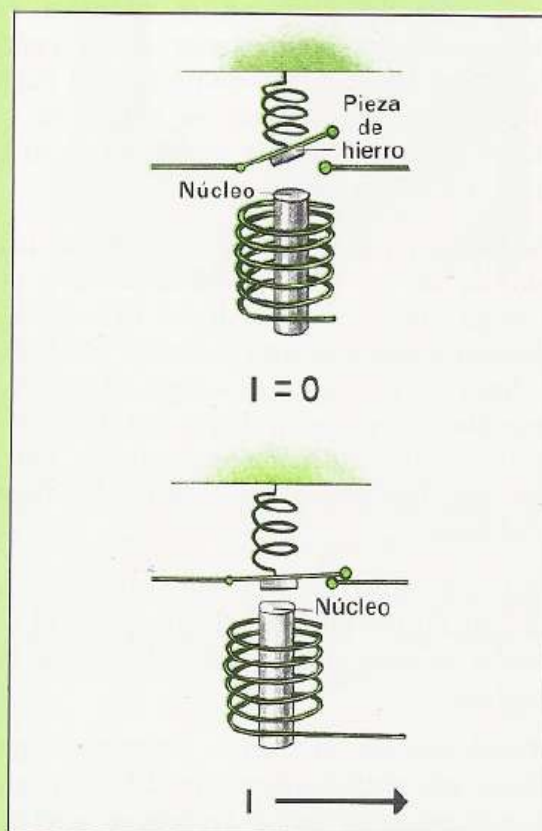
Al dispositivo formado por una bobina arrollada alrededor de un núcleo de hierro se le denomina **electroimán**, y el núcleo de hierro se comporta como un imán solamente cuando circula una corriente eléctrica por la bobina.



Los electroimanes se emplean abundantemente en la industria. Algunos de ellos desarrollan campos magnéticos de una gran intensidad, hasta el extremo de que algunas grúas levantan automóviles simplemente por la fuerza atractiva del electroimán que llevan colgando.



Una aplicación muy interesante de los electroimanes es la de los **relés** o relevadores, que son dispositivos que consisten en un núcleo ferromagnético fijo y otro móvil. Cuando circula corriente por la bobina, el núcleo fijo atrae hacia sí al núcleo móvil, que vence la fuerza de un muelle y cierra un circuito eléctrico.



Cuando la corriente deja de circular por la bobina, el núcleo fijo pierde su fuerza de atracción magnética y el muelle tira del núcleo móvil, abriéndose el circuito eléctrico.

Los relés sirven, pues, de interruptores automáticos. Pueden disponer de muchos núcleos móviles que abran o cierren simultáneamente varios circuitos eléctricos con una única señal de mando, que consiste en la corriente que circula por la bobina.

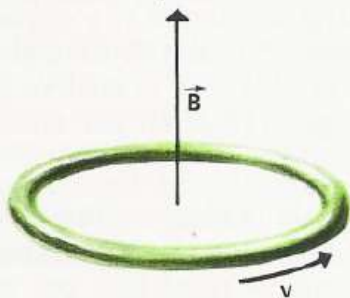
Fundamento atómico de los fenómenos magnéticos. Explicación del ferromagnetismo

Recordemos la constitución elemental del átomo. En el centro del átomo se encuentran las cargas positivas (protones) y a su alrededor giran las cargas negativas (electrones). Los electrones tienen una masa muy pequeña y una velocidad muy grande. Sus trayectorias son cerradas, de modo que (en conformidad con el experimento de Rowland) deben ser equivalentes a una pequeña corriente que recorra una espira. Para fijar ideas, comencemos por analizar el átomo más sencillo, el de hidrógeno, que solamente tiene un protón y un electrón.

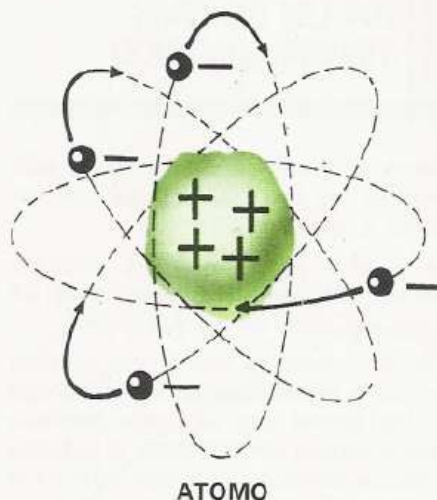
El electrón describe una trayectoria cerrada y plana, con una determinada velocidad.

Podemos suponer que la carga total del electrón está distribuida homogéneamente a lo largo de un anillo de diámetro igual al de la órbita del electrón (que podemos suponer que es circular).

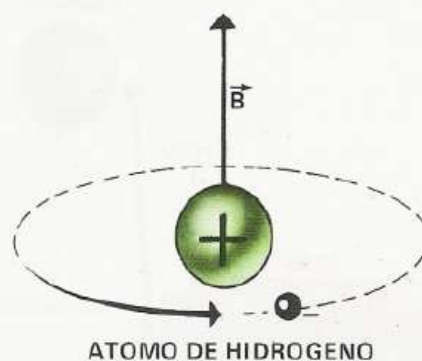
A efectos eléctricos, si este anillo uniformemente cargado gira a una cierta velocidad, sus resultados serán los mismos que los que se obtenían de una espira plana recorrida por una corriente.



Observamos que el protón no se mueve. Al tratarse de una carga en reposo, su contribución al campo magnético es nula. En estas condiciones, en el átomo de hidrógeno circula una débil corriente eléctrica que recorre una espira. El átomo de hidrógeno equivale, pues, a un pequeño imán. La espira tendrá dos caras, la cara N y la cara S, y el vector del campo magnético resultante estará dirigido perpendicularmente al plano de la órbita del electrón (que es el mismo que el de la espira equivalente), y su sentido vendrá determinado por la regla de la mano derecha.



ATOMO



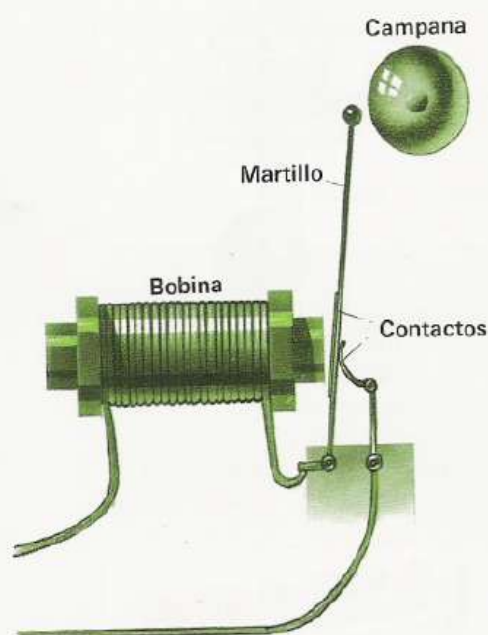
ATOMO DE HIDROGENO

OTRAS APLICACIONES DE LAS BOBINAS: TIMBRE ELECTRICO

Además de los relés, existen otras aplicaciones de las bobinas, que nos resultan familiares a todos.

Una de ellas es la del timbre eléctrico, que es el empleado en las puertas de las viviendas, así como en los teléfonos.

El timbre consta de una bobina provista de un núcleo ferromagnético, cerca del cual existe una lámina que se puede desplazar al resultar atraída por la bobina. El extremo de la lámina golpea una campana, que es la que produce el sonido.



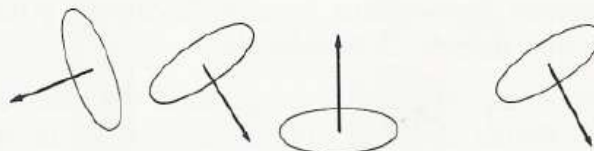
El circuito está interrumpido por una lámina fija, que está en contacto con la móvil. Cuando la corriente circula, la bobina atrae a la lámina fija y el circuito se abre, con lo cual la bobina deja de atraer a la lámina móvil. Otra vez se cierra el circuito y se vuelve a repetir el proceso.

Como resultado, la lámina empieza a vibrar golpeando repetidas veces la campana y produciéndose el sonido característico.

Esto nos dice que en su estado natural el hidrógeno (y, en general, cualquier material) presenta un campo magnético atómico permanente.



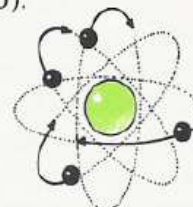
En un volumen cualquiera de hidrógeno los átomos estarán dispuestos al azar y los planos de las órbitas electrónicas estarán orientados en una dirección cualquiera. Por eso el campo magnético resultante de una masa de hidrógeno cualquiera es nulo, ya que equivale a la suma vectorial de muchos vectores de igual intensidad, pero cada uno de un sentido diferente.



Lo que hemos explicado para el hidrógeno, ¿se puede aplicar también a otros átomos más complicados?

Un átomo cualquiera constará de varios protones y de varios electrones. Los protones siempre ocupan la posición central del átomo y, a causa de su gran masa, no se mueven. Su contribución al campo magnético atómico es nula, por lo cual ya podemos hacer la primera generalización del átomo de hidrógeno.

Los electrones de cualquier átomo describen órbitas cerradas. A efectos eléctricos, ocurre como si hubiese varias espiras recorridas por pequeñas corrientes (precisamente tantas espiras como electrones posea el átomo).



Pero cada electrón recorre una órbita distinta. Cada órbita puede estar en un plano distinto, y entre un átomo y otro no tienen por qué coincidir los planos de las órbitas electrónicas.

Ello hace que cada átomo tenga un campo magnético atómico distinto, ya que será la suma vectorial de los campos magnéticos debidos a la trayectoria de cada electrón, teniendo en cuenta que solamente intervienen algunos de los electrones de la capa más externa.

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan porque sus átomos poseen una gran homogeneidad. El campo magnético atómico tiene un valor constante en magnitud y sentido, y existen zonas de material (llamadas **dominios magnéticos**) en las que todos los vectores del campo magnético son paralelos. En esas condiciones, la suma vectorial de muchos vectores iguales y paralelos, en el mismo sentido, nos dará un vector campo resultante de un determinado valor.

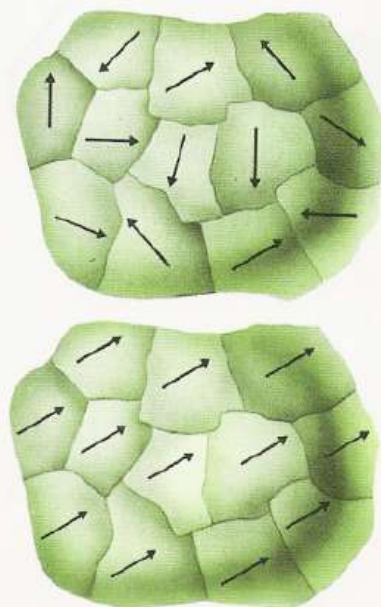
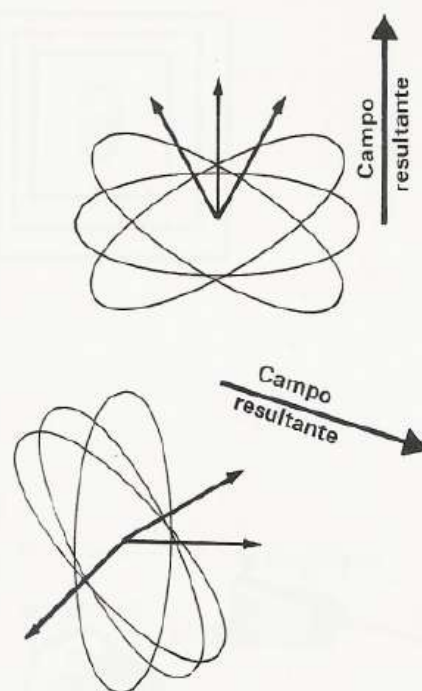
En un trozo de material ferromagnético cualquiera existirán muchos dominios magnéticos y cada uno tendrá su vector orientado en un sentido distinto. Este es el caso del hierro dulce, por ejemplo.

Pero en los materiales ferromagnéticos los dominios magnéticos poseen una gran facilidad para cambiar la dirección y sentido de sus campos magnéticos elementales. Si a un trozo de material ferromagnético se le comunica un campo magnético exterior, los dominios se orientarán de manera que sus vectores queden paralelos.

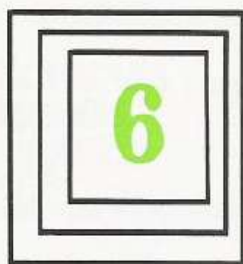
En el caso del hierro dulce, al desaparecer el campo magnético exterior, los dominios volverán a descolocarse. Otros materiales ferromagnéticos, sin embargo, conservarán la orientación producida por el campo magnético aplicado exteriormente. Estos materiales presentarán un campo magnético permanente que se apreciará desde el exterior.

Esta es la explicación de la existencia de los **imanes permanentes**, tanto naturales como artificiales. El misterioso «fluido magnético» que poseen no es ya tan misterioso, ni tampoco fluido.

¿Cómo se hace un imán permanente? Se toma un trozo de material ferromagnético y se somete a un campo. Una vez retirado el campo, el material presenta unos dominios magnéticos orientados permanentemente, con lo cual posee un campo magnético propio. El material se puede someter al proceso de imantación frotándolo con otro imán o introduciéndolo en una bobina recorrida por una corriente.

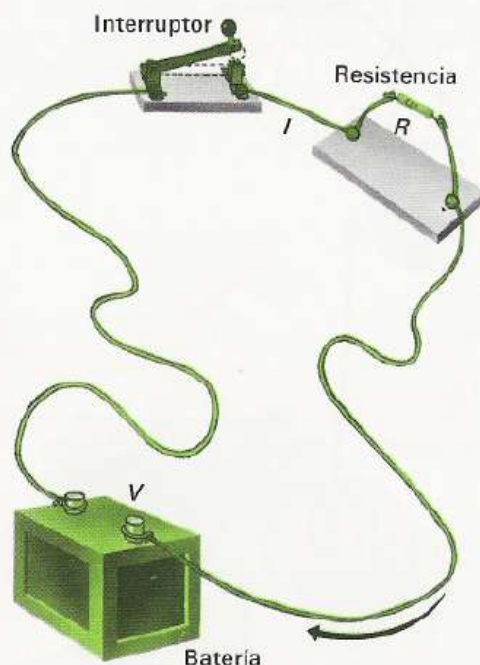


Dominios magnéticos de un material ferromagnético.



CORRIENTE ALTERNA. IMPEDANCIA

Corrientes continuas



Hasta ahora hemos estudiado solamente la corriente continua, es decir, aquella que permanece constante a lo largo del tiempo. Claro está que esta definición no es correcta. Si no añadimos nada más, parece que las corrientes continuas son eternas.

En Física no hay nada eterno; no obstante, si un fenómeno cualquiera permanece invariable durante un tiempo suficiente, decimos que el fenómeno es constante. Eso es precisamente lo que ocurre con la corriente continua.

Si tenemos un circuito formado por una batería, un interruptor y una carga (que en nuestra figura representamos por una resistencia R), en el momento en que se cierre el interruptor circulará una corriente cuya intensidad I vendrá impuesta en función de la diferencia de potencial V de la batería y de la resistencia R de la carga.

Como ya sabemos, la relación que liga estas tres magnitudes es la ley de Ohm, que ya conocemos:

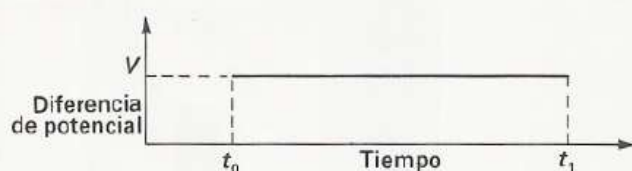
$$I = \frac{V}{R}$$

Y ya no ocurrirá nada nuevo en el circuito. Desde el instante en que se cierre el interruptor, la corriente I circulará por el circuito, y así se mantendrá la situación hasta que volvamos a abrir el interruptor, interrumpiendo la corriente.

Lo que ocurre en el circuito en el tiempo comprendido entre el cierre y la apertura del interruptor es independiente de lo largo que sea el tiempo

comprendido entre esos dos hechos. Si observamos el circuito en cualquier instante comprendido entre el cierre y la apertura del interruptor, veremos lo mismo, independientemente de que haya transcurrido un minuto o una hora desde que la corriente empezó a circular. Por eso llamamos continua a esta corriente, que es la que suministran todas las pilas y baterías de tipo químico.

Podemos representar el comportamiento de la corriente continua en función del tiempo. Si tomamos el eje horizontal o de abscisas como tiempo, y el eje vertical o de ordenadas como diferencia de potencial, tendremos:



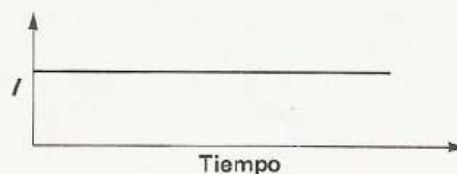
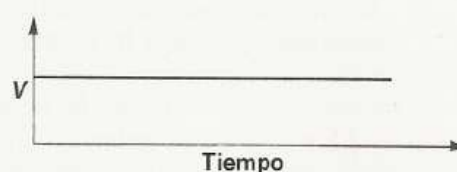
La gráfica será una recta horizontal, lo que nos indicará que la diferencia de potencial se mantiene constante e igual al valor V durante el tiempo comprendido entre t_0 (instante del cierre del interruptor) y t_1 (instante de la apertura del mismo).

Lo que nos interesa a nosotros es analizar el fenómeno que ocurre en situación estacionaria, es decir, entre t_0 y t_1 . Para ello no nos interesa (al menos, de momento) analizar t_0 ni t_1 . Prescindimos, pues, de esos dos puntos de la gráfica y dibujamos una recta ilimitada. Esa es la gráfica de la corriente continua.

También podemos representar en el eje vertical cualquier otro parámetro de la corriente; por ejemplo, su intensidad. Como en el caso anterior, la gráfica será una recta paralela al eje de los tiempos.

Si la corriente continua recorre un circuito donde existe una bobina o solenoide, se creará un flujo magnético que se mantendrá constante con el tiempo. Si recorre una resistencia, se disipará una determinada cantidad de energía en forma de calor, tal como nos dice la ley de Joule.

Si en un circuito intercalamos un condensador, una vez que éste esté cargado ya no circulará ninguna corriente, ya que la corriente no se transmite por los dieléctricos.



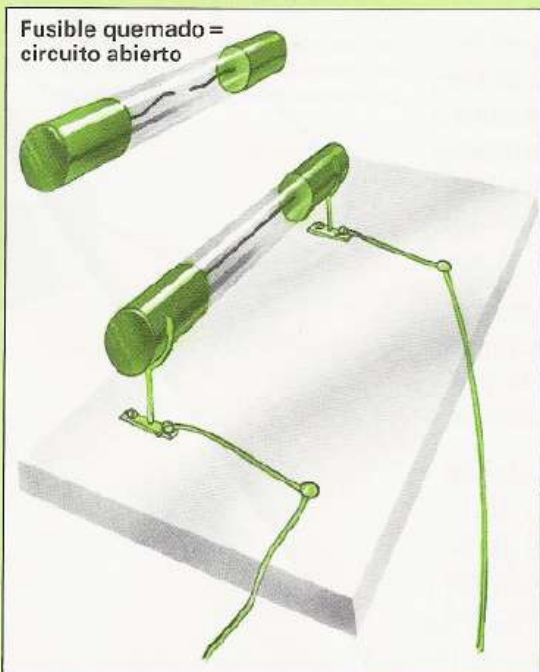
En una corriente continua, tanto la diferencia de potencial como la intensidad permanecen constantes a lo largo del tiempo.

FUSIBLES

Cuando una corriente eléctrica (o, en el caso más general, un conductor, ya que todo conductor presenta una resistencia al paso de la corriente eléctrica) recorre una resistencia cualquiera, dicho conductor se calienta. Este efecto de elevación de la temperatura ocasionado por el paso de la corriente se denomina **efecto Joule**.

El desprendimiento de calor es directamente proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad de la corriente que circula por él. Si la intensidad se hace doble, el calentamiento del conductor se hará cuatro veces mayor.

Si la corriente que circula es excesivamente grande, el desprendimiento de calor del conductor puede ser tan grande que éste alcance su punto de fusión y se rompa, interrumpiéndose así el paso de corriente por el circuito.



Los fusibles se construyen de aleaciones de plomo, debido a su baja temperatura de fusión. Por ello se les conoce también como «plomos».

Esta situación que, si ocurriese en toda una red de conducción eléctrica, podría ser catastrófica, es, sin embargo, sumamente interesante.



Instalación de un fusible de interruptor. (Automático.)

Cuando se desea proteger un circuito se intercala en serie con él un aparato llamado **fusible**, que consta de un cartucho envolvente en cuyo interior se encuentra un hilo de un material de bajo punto de fusión.

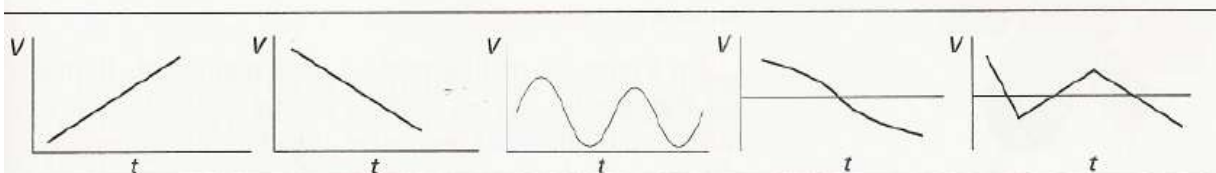
Si la corriente que circula por el fusible es excesiva, el calentamiento del hilo será tan grande que éste se fundirá (por eso el dispositivo se llama fusible) y el circuito quedará abierto, no circulando ya más corriente hasta que se ponga otro fusible nuevo.

Otras veces se colocan fusibles automáticos que llevan un interruptor incorporado que queda abierto cuando circula una corriente excesivamente elevada.

Corrientes que varían con el tiempo

Según el criterio que hemos empleado para definir una corriente continua en el epígrafe anterior, podemos decir que una corriente variable es cualquier corriente que no es continua. También podemos decir lo mismo empleando otras palabras: corriente variable es la que tiene una representación gráfica que es cualquier cosa menos una recta paralela al eje de los tiempos.

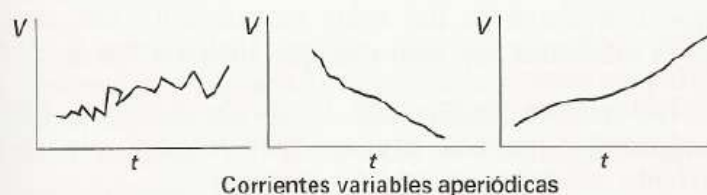
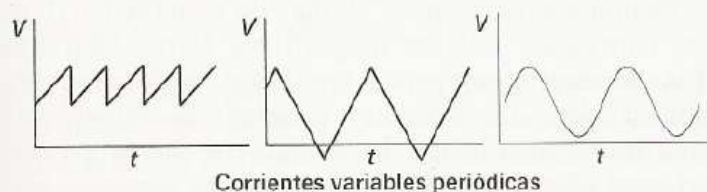
Veamos algunos ejemplos de gráficas de corrientes variables:



Podemos establecer una primera clasificación de las corrientes variables: periódicas y no periódicas o aperiódicas.

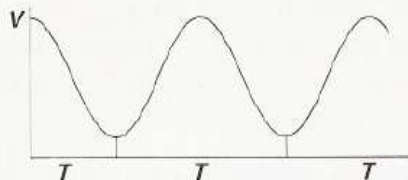
CORRIENTES PERIODICAS Y APERIODICAS

Si la gráfica representativa de la corriente variable presenta una cierta simetría en varias partes, repitiéndose la misma forma geométrica a lo largo del eje de los tiempos, decimos que es una **corriente variable periódica**. En el caso contrario, se trata de una **corriente variable aperiódica**.



Las corrientes periódicas se caracterizan, como hemos dicho, porque su gráfica se repite cada cierto intervalo de tiempo. A ese intervalo se le llama **período** y se suele representar con la letra T .

Es evidente que, si conocemos lo que ocurre en el período T , conoceremos lo que ocurra en cualquier otro instante, ya que el período T se repite constantemente.



El período T es un tiempo y, por consiguiente, se mide en unidades de tiempo (en segundos, casi siempre).

En Física se utiliza mucho otra magnitud, llamada **frecuencia**, que es inversa del período. Se define como el número de períodos que hay en un segundo, y se suele representar con la letra griega ν (se lee nü).

$$\nu = \frac{1}{T}$$



Distintos generadores de corriente continua.

Obtención de corrientes variables

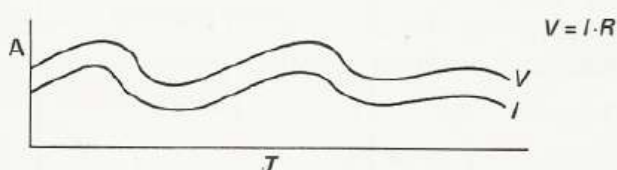
Las corrientes continuas ya sabemos cómo se obtienen. Podemos realizar el transporte de cargas por procedimientos manuales, como en el generador de Van der Graaf, o por procedimientos químicos, como ocurre con las pilas y acumuladores.

También existen otras formas de generar corrientes continuas. Existen dispositivos termoeléctricos que producen corrientes continuas cuando se les aplica calor. También hay generadores fotoeléctricos, que transforman la energía luminosa en corrientes eléctricas. Quizás el caso más conocido sea el de los paneles solares de los satélites artificiales, que convierten la luz solar en corriente eléctrica para alimentar los aparatos que llevan a bordo.

Todos estos generadores tienen de común el que únicamente pueden proporcionar un tipo de corriente eléctrica: corriente continua.

Si nosotros necesitamos una corriente variable, ¿de qué generador echaremos mano? Lo primero que necesitamos saber es qué forma deseamos que tenga la corriente variable. Si es aperiódica, podemos utilizar un generador convencional, por ejemplo, una batería, y modificar la tensión o la corriente producida por el generador, intercalando en el circuito una resistencia variable y haciendo variar manualmente el valor de ésta.

Si movemos manualmente la resistencia variable R , podemos obtener la forma de la gráfica que deseamos.



La intensidad de la corriente observada en el amperímetro variará de acuerdo con las variaciones que establezcamos en el valor de R .

Si lo que deseamos obtener es una corriente periódica, la variación que hagamos en el circuito deberá ser también periódica. Por ejemplo, imaginemos una corriente de forma rectangular.

Esta corriente se llama «onda cuadrada» y se utiliza con mucha frecuencia en aplicaciones técnicas de la Electrónica.

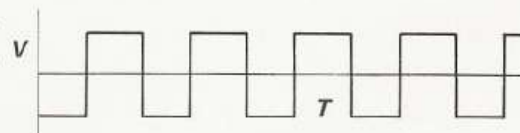
Una forma sencilla de obtener una onda cuadrada es intercalar un interruptor en el circuito y abrirlo y cerrarlo periódicamente. La diferencia de potencial o tensión máxima de la onda (llamada **amplitud**) dependerá de la batería utilizada. El número de ondas que haya en la unidad de tiempo (frecuencia) dependerá de la velocidad con que seamos capaces de abrir y cerrar el interruptor.

En general, cada tipo de corriente necesitará de un mecanismo diferente para su obtención. Cuanto más alta sea la frecuencia, más difícil será obtener por medios mecánicos la corriente variable periódica deseada.

Lo que sí debe quedar claro es que no existen generadores que nos proporcionen corrientes periódicas espontáneamente. En todos los casos se deberá someter un generador convencional a unas determinadas manipulaciones.



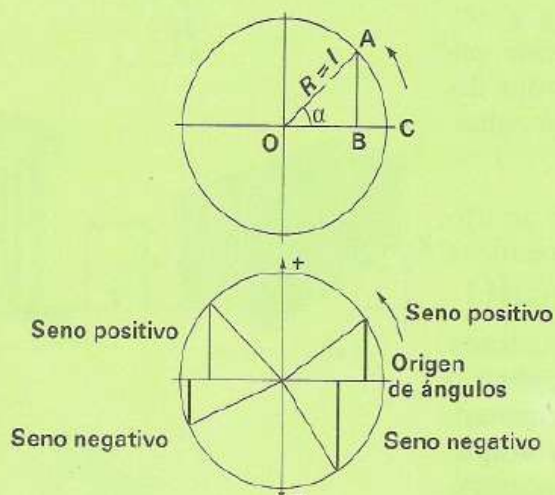
Variando la posición del cursor de la resistencia, se pueden obtener corrientes variables.



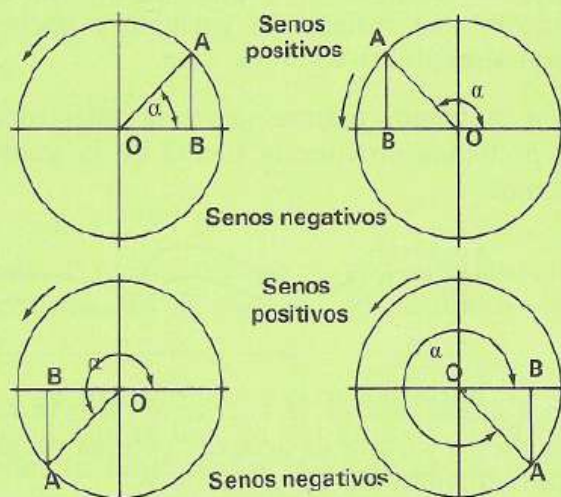
NOTAS SOBRE FUNCIONES TRIGONOMETRICAS

Una **onda senoidal** o **sinusoidal** es la representación gráfica de una función trigonométrica llamada **seno**.

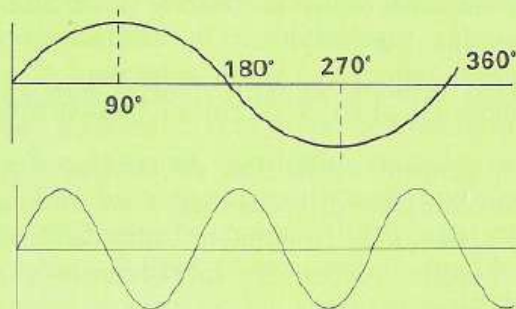
Si consideramos una circunferencia de radio 1 dividida en cuatro cuadrantes y dibujamos en ella un determinado ángulo α , tendremos un triángulo rectángulo ABO. Por definición, llamamos seno del ángulo α , y lo representamos como $\sin \alpha$, a la relación entre los segmentos $\frac{AB}{AO}$; pero AO es el radio de la circunferencia, que hemos dicho que es igual a la unidad; luego el segmento AB representa el seno del ángulo α .



Si suponemos que los ángulos crecen a partir del origen y consideramos que el origen es la semirrecta OC y que dichos ángulos aumentan en el sentido contrario al de las agujas de un reloj, los valores de los ángulos variarán entre 0 y 360° (es decir, el radio OA dará una vuelta completa y el seno partirá de 0 (para un ángulo de 0°), llegará a alcanzar un valor positivo máximo igual a $+1$ (para $\alpha = 90^\circ$), alcanzará otra vez el valor 0 (para $\alpha = 180^\circ$), empezará a hacerse negativo, alcanzando el valor máximo negativo igual a -1 para $\alpha = 270^\circ$ y llegará a 0 otra vez para $\alpha = 360^\circ$.



Si representamos la variación del seno del ángulo α , es decir, del segmento AB, en función de dicho ángulo α , tendremos la gráfica llamada **sinusoide** o **senoide**. Volviendo a la analogía con las corrientes eléctricas periódicas, está claro que un período como el representado corresponde a un ciclo, es decir, a una vuelta completa a la circunferencia. Si el segmento OA gira constantemente alrededor del centro, los ciclos se repetirán a razón de uno por cada vuelta. Si el número de vueltas es muy alto, la representación estará formada por un número indefinido de ciclos.



Esta representación coincide con la de la tensión correspondiente a una corriente alterna durante un tiempo suficientemente largo.

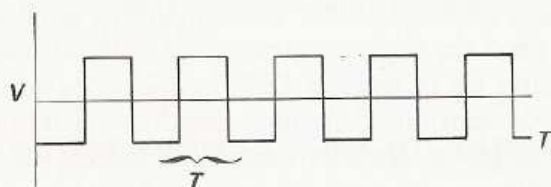
Corrientes alternas

Hay un tipo de corriente variable periódica que es extremadamente interesante. Es la corriente alterna. ¿Por qué se llama corriente alterna?

En la corriente continua convencional las cargas eléctricas circulan siempre en un sentido. En la corriente alterna, el sentido de circulación de la corriente cambia una vez en cada período.

Sucede como si cambiáramos la polaridad del generador una vez cada período T de la corriente.

La gráfica de una corriente alterna obtenida así sería la de una **onda cuadrada simétrica** respecto al eje de los tiempos.



La onda es simétrica porque su amplitud máxima es V^+ y V^- , siendo el eje de tensiones positivo hacia arriba y negativo hacia abajo, y porque el valor absoluto de V^+ es igual al de V^- .

La conmutación o cambio de polaridad puede hacerse de otra manera, es decir, en vez de tan rápidamente, más gradualmente.

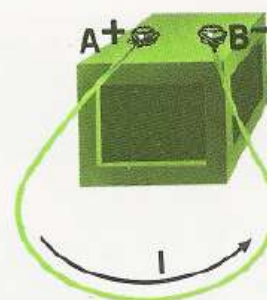
Vamos a dejar aquí suspendida la discusión sobre corrientes alternas y retroceder al fenómeno de la inducción electromagnética de Faraday, que estudiamos en el capítulo dedicado al Magnetismo.

Imaginemos que disponemos del siguiente artículo experimental:

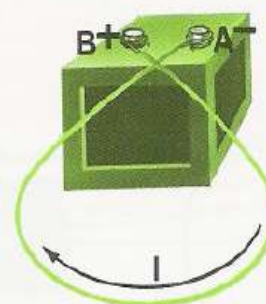
Una bobina circular que puede girar alrededor de un eje. Los extremos de la bobina los unimos a dos anillos cilíndricos sobre los que rozan unas piezas metálicas llamadas escobillas.

La bobina corta las líneas de fuerza del campo de un imán.

Si la bobina permanece quieta, siempre cortará la misma cantidad de flujo magnético, y la corriente inducida será nula.



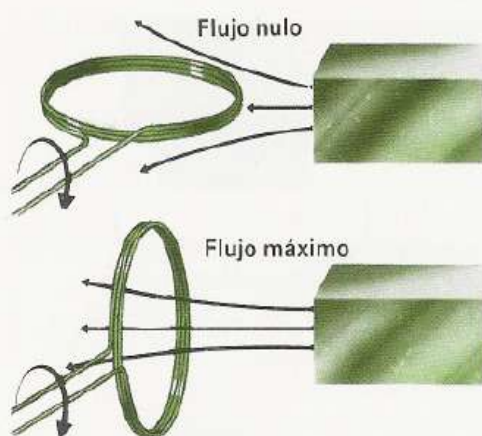
Aquí la corriente circula de A a B.



Aquí la corriente circula de B a A.



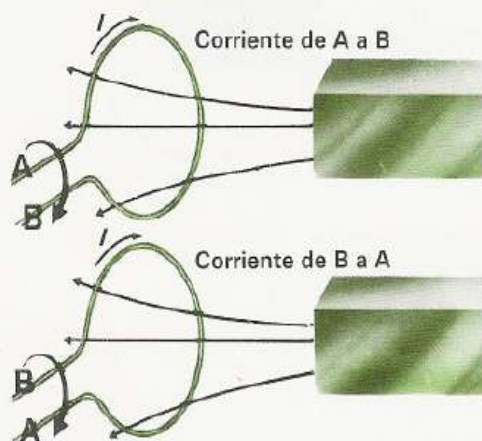
Fundamento del alternador.



Si hacemos girar la bobina, en cada nueva posición cortará un número distinto de líneas de campo. Por consiguiente, se inducirá una corriente que podremos extraer uniendo unos cables a las escobillas.

Cuando la bobina tenga su plano paralelo al vector del campo magnético, la superficie de la bobina no cortará ninguna línea de fuerza y la corriente inducida será mínima (obsérvese la figura).

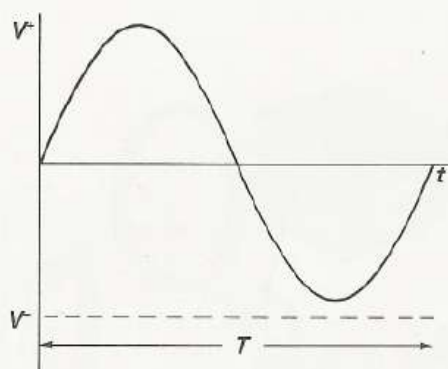
Por el contrario, cuando el plano de la bobina sea perpendicular al vector del campo magnético, el número de líneas de fuerza que cortará la bobina (y, por lo tanto, el flujo) será máximo, siendo máxima entonces la corriente inducida.



Por cada vuelta completa de la bobina, la corriente inducida alcanzará un valor máximo, llegará a ser nula y alcanzará otro valor máximo igual al anterior, pero de signo contrario, ya que, al cambiar la posición de la bobina 180° , la corriente inducida cambia de sentido. Podemos visualizar el fenómeno mucho mejor si consideramos una espira en lugar de la bobina.

Si marcamos un extremo de la espira con una A y el otro con una B, la corriente circulará del extremo A al B en el primer caso, y del extremo B al A en el segundo, que se diferencia del anterior solamente en que la bobina ha girado 180° (media vuelta).

La forma de la corriente obtenida será la representada en el gráfico inferior. Esta corriente alterna se conoce también como corriente sinusoidal o senoidal.



ALTERNADORES

La corriente alterna se obtiene de unas máquinas llamadas alternadores. El alternador consta de dos conjuntos llamados rotor y estator.

El rotor está colocado en el interior del estator y puede girar alrededor de su eje. Al girar, las bobinas que lleva cortarán el flujo magnético producido por las piezas polares del estator y se inducirá una corriente alterna.

La frecuencia de la corriente alterna dependerá del número de revoluciones por segundo que dé el rotor dentro del estator.

Por cada vuelta entera se completa un ciclo de la corriente alterna, de modo que para mantener constante la frecuencia de la corriente alterna se deberá mantener constante la velocidad de giro del rotor del alternador.

El fundamento del alternador, como se puede ver, es el de la inducción de Faraday.

En los países de Europa la frecuencia de la corriente alterna utilizada en los hogares y en las fábricas es de 50 ciclos por segundo (c/s), es decir, el rotor de los alternadores gira a 3.000 revoluciones por minuto (r.p.m.), o 50 revoluciones por segundo.

En los países de América se emplea la frecuencia de 60 c/s, por lo cual los rotores de los alternadores de esos países deberán girar a 3.600 r.p.m. (ver Apéndice 2, nota 14).

Comportamiento de un circuito ante la corriente alterna

Ya conocemos los efectos de una corriente continua al pasar por un circuito cualquiera. Si en el circuito existe una resistencia, se disipará una cierta cantidad de energía por el efecto Joule. Si existe un condensador, éste se cargará, polarizándose su dieléctrico (para lo cual absorberá una pequeña energía), y después no circulará corriente. Si existe una bobina, se establecerá un campo magnético (para lo cual, en el momento inicial, también se absorberá una pequeña energía) y después la bobina se comportará como una resistencia de poco valor, ya que el flujo magnético no variará.

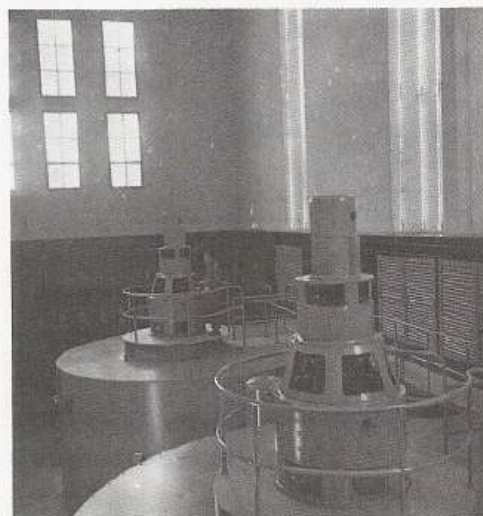
Las cosas son muy distintas si el circuito lo recorre una corriente alterna. La resistencia disipará energía por el efecto Joule, lo mismo que si se tratase de una corriente continua. El condensador, sin embargo, sí permitirá el paso de corriente, ya que un dieléctrico se polarizará, se despolarizará y se volverá a polarizar en sentido contrario una vez por cada ciclo, es decir, una vez por cada cambio de polaridad de sus armaduras. En el condensador se disipará una cierta energía que no existía con la corriente continua. El condensador opondrá una «resistencia» al paso de la corriente alterna.



Generador de corriente desmontado. A la izquierda se encuentra el rotor. Se pueden apreciar sus bobinas introducidas en las hendiduras del cilindro central.



Grandes alternadores en una central hidroeléctrica.



POLARIZACION

A una molécula química formada por dos extremos con distinta carga eléctrica se la llama **molécula polar**. Al estado eléctrico que presenta se le denomina normalmente **dipolo**.

Un dipolo molecular se puede representar como una estructura alargada, con sus extremos cargados eléctricamente con cargas de signo contrario.

Hay sustancias que presentan sus moléculas en forma dipolar, con sus cargas eléctricas separadas. Estas sustancias se denominan **polares**. Hay otras cuyas moléculas no presentan esta propiedad, y se llaman sustancias **apolares**.



Cuando se aplica un campo eléctrico exterior, las moléculas de las sustancias polares (es decir, los dipolos) se orientan paralelamente al campo. Entonces se dice que el material está **polarizado**, y a esta cualidad se la denomina **polarización**.



Para distinguir esta propiedad que los condensadores presentan ante la corriente alterna de la resistencia pura que conocemos en la corriente continua, o resistencia atómica, empleamos el término **reactancia**. Al tratarse de un condensador, la denominamos **reactancia capacitiva** o **capacitancia**.

¿Qué ocurrirá con la bobina? Al cambiar el sentido de la corriente que recorre la bobina, cambiará el flujo magnético. El vector del campo apuntará en una dirección y alcanzará su valor máximo, se anulará y volverá a alcanzar otra vez el valor máximo, apuntando en dirección contraria. Todo este proceso lo realizará una vez por cada ciclo de la corriente alterna, por lo cual se disipará también una cierta energía que no se disiparía si el circuito estuviese recorrido por una corriente continua. A esta propiedad que presentan las bobinas frente a la corriente alterna se la llama **reactancia inductiva** o **inductancia**.

Impedancia

En un circuito recorrido por una corriente alterna, ¿se cumplirá también la ley de Ohm? Sí, si en vez de considerar la resistencia pura o resistencia óhmica consideramos la impedancia, que será la suma de la capacitancia y de la inductancia, además de la resistencia pura que pueda existir en el circuito.

Pero con esto no basta. En un circuito recorrido por una corriente continua la resistencia es prácticamente constante. Es una cualidad intrínseca del material y su valor no varía con los parámetros de la corriente que la recorre.

En un circuito recorrido por una corriente alterna no ocurre así. La resistencia óhmica del circuito será la misma siempre, pero las reactancias no. Tanto la reactancia inductiva como la capacitiva dependerá de la frecuencia de la corriente que recorre el circuito, ya que al aumentar la frecuencia, en el condensador se debe polarizar y despolarizar el dieléctrico más veces por segundo, y ello hace que se disipe más energía en el condensador. Lo mismo ocurre en la bobina, donde el campo debe cambiar de sentido más veces por segundo y, por tanto, hace que se disipe más energía.

Esta consecuencia es tan importante que merece que la destaquemos:

En un circuito recorrido por una corriente alterna, la reactancia, tanto capacitiva como inductiva, varía con la frecuencia de la corriente.

La reactancia inductiva crece al aumentar la frecuencia, y la reactancia capacitiva disminuye al aumentar la frecuencia.

Como consecuencia de ello deberemos formular una nueva ley de Ohm para cada frecuencia de la corriente.

Dicha ley de Ohm es:

$$V = |Z| \cdot I$$

La ley de Ohm en alterna se formula igual que la de continua, pero empleando la impedancia $\vec{Z}$ en vez de la resistencia R .

Para hacer el estudio vectorial completo debemos expresar $\vec{Z}$, dando su módulo y su sentido.

No obstante, en la práctica basta, en muchas ocasiones, con conocer su módulo, prescindiendo de la dirección y sentido.

La expresión que nos da el módulo de $\vec{Z}$, y que se representa por $|\vec{Z}|$, es la siguiente:

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

y se mide en ohmios, lo mismo que la resistencia.

Las reactancias capacitivas X_C e inductiva X_L están relacionadas con la frecuencia mediante las expresiones

$$X_L = 2\pi\nu L$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

donde ν = frecuencia de la corriente, expresada en ciclos por segundo (c/s);

C = capacidad, expresada en faradios (F);

L = autoinducción, expresada en henrios (H).

FUGAS DEL DIELECTRICO

A la fuerza de rozamiento interno que tienen que vencer los dipolos moleculares se debe que aparezcan pérdidas de energía en los dieléctricos (llamadas «pérdidas o fugas del dieléctrico»). Al aumentar la frecuencia, los dieléctricos van perdiendo paulatinamente sus propiedades y, si la frecuencia es excesivamente alta, aparecen efectos térmicos que pueden dar lugar a la destrucción del material.

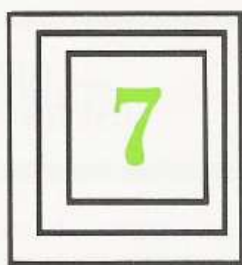
Este fenómeno es el fundamento de los hornos de radiofrecuencia, en los que se provoca el calentamiento o incluso la fusión de algunas sustancias acercándolas a un circuito donde se produce una corriente alterna de frecuencia muy elevada.

En las pérdidas del dieléctrico se basan las cocinas y hornos de microondas, en los que las sustancias que se desea cocinar (dieléctricas todas ellas) se introducen en el seno de un campo electromagnético de muy alta frecuencia.

Otra aplicación interesante es el bisturí eléctrico, que permite abrir heridas sin emplear instrumentos cortantes, y que presenta la ventaja de disminuir la hemorragia y facilitar la coagulación de la herida.

Horno de microondas para uso doméstico.





CORRIENTES DE MUY ALTA FRECUENCIA

La acción de condensadores y bobinas

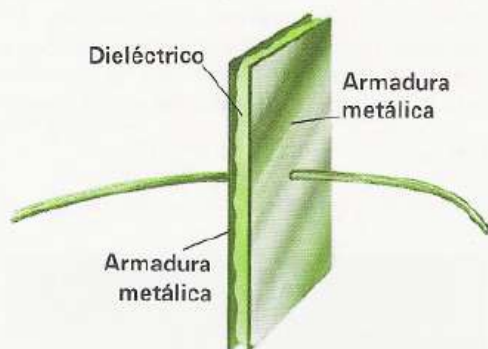
Ya hemos visto que la corriente alterna produce efectos muy interesantes en los condensadores y en las bobinas. Vamos a repasar brevemente estos efectos antes de proseguir el estudio del comportamiento de la corriente alterna en circuitos complejos, formados precisamente por condensadores y bobinas, y que da lugar a una nueva manifestación de la energía electromagnética: la energía radiante.

Recordemos que un condensador es un sistema formado por dos láminas metálicas separadas por un dieléctrico. Ya sabemos que la corriente continua solamente circula durante un instante posterior al cierre del circuito. Al adquirir las dos placas una diferencia de potencial; se establece un campo eléctrico que actúa sobre el material dieléctrico interpuesto entre las placas metálicas o armaduras.

¿Cómo actúa el material dieléctrico frente a este campo eléctrico? Sus moléculas están formadas por cargas eléctricas separadas (tanto más separadas cuanto mayor sea el campo eléctrico) y constituyen unos pequeños dipolos.

Como podemos ver, existe una interacción entre el circuito y el material dieléctrico. Dicho material posee una especie de «memoria», ya que su naturaleza interna se modifica en función de la corriente que recorre el circuito. Naturalmente, dicha modificación se produce a expensas de una parte de la energía eléctrica del circuito.

¿Qué sucede con la corriente alterna? Con cada cambio de polaridad de las armaduras (un cambio por cada ciclo de la corriente), los dipolos molecu-



Esquema idealizado de un condensador.

lares se orientan en un sentido o en otro, para lo cual deben girar dentro del material, cambiando su orientación 180° por cada ciclo de la corriente.

Pero los dipolos moleculares no están totalmente sueltos ni se pueden mover dentro del material a su antojo. Existe una especie de rozamiento interno entre ellos y entre el resto de las moléculas del material.

En realidad ocurre como si los dipolos estuviesen sumergidos en un medio viscoso, como el aceite o la miel.

Con cada cambio de polaridad de la corriente existe un cambio de orientación de los dipolos moleculares. Evidentemente, cuanto más alta sea la frecuencia de la corriente, tanto mayores serán las dificultades que tendrán los dipolos para «seguir» las órdenes que les dan las armaduras y mayor será la fuerza de «viscosidad» o «rozamiento» interno del dieléctrico.

Como consecuencia de esta actitud del dieléctrico vemos que existe un intercambio efectivo de energía entre el circuito y el condensador.

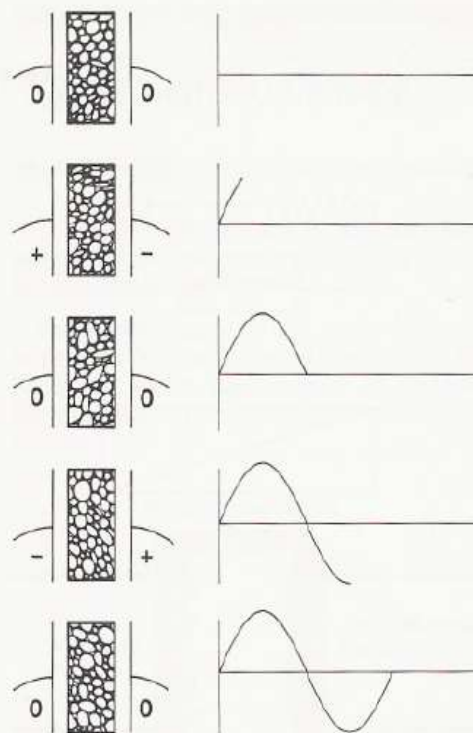
El condensador se comporta como un almacén de energía eléctrica y es capaz de entregar su energía almacenada internamente al resto del circuito, bajo unas determinadas condiciones.

Ya sabemos que la característica definitoria de un condensador es su capacidad. Cuanto mayor sea la capacidad de un condensador, mayores serán sus efectos sobre la corriente alterna.

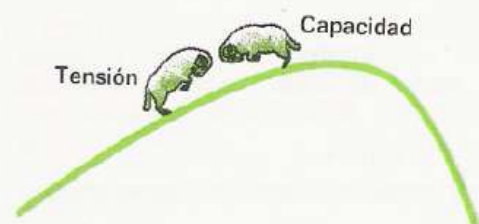
Pero ¿cuáles son esos efectos? El condensador se opone a que cambie la tensión en el circuito. Precisamente el comportamiento del material dieléctrico es el responsable de que el condensador presente una determinada inercia a los cambios de tensión.

¿Qué pasaba en un circuito alterno formado por una resistencia pura (o resistencia óhmica)? Al no aparecer ningún efecto de «inercia eléctrica», la intensidad de la corriente crecía al mismo tiempo que la tensión aplicada.

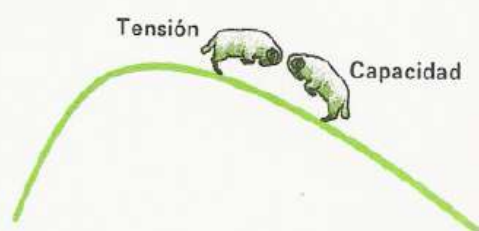
Dicho en otras palabras: **la tensión y la corriente en un circuito recorrido por una corriente alterna alcanzan sus valores máximos y mínimos al mismo tiempo, es decir, están en fase siempre que en el circuito exista solamente resistencia óhmica.**



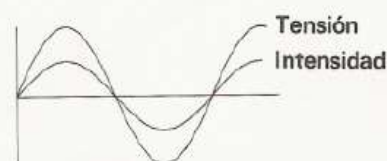
Cambios de polaridad en un dieléctrico.

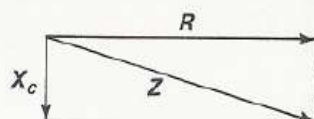
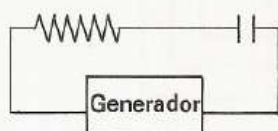
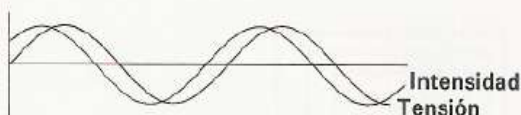


Si la tensión crece, el condensador tiende a oponerse a ese crecimiento.



Si la tensión disminuye, el condensador tiende también a oponerse a que disminuya.





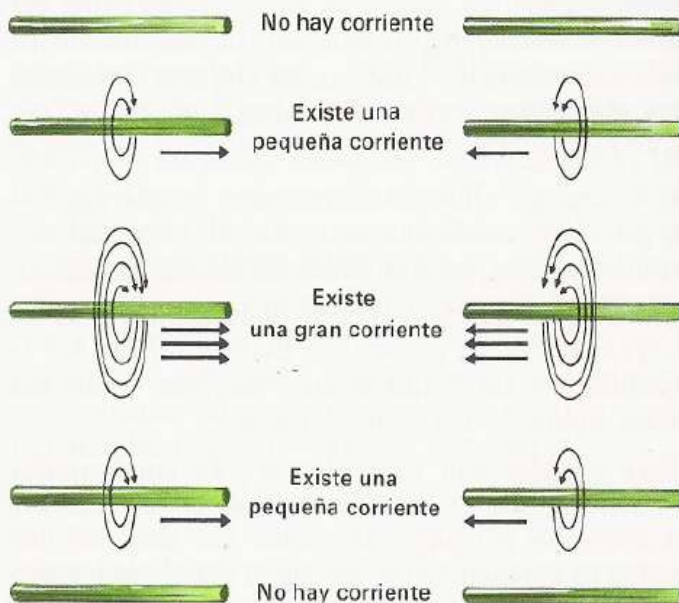
Cuando, además de la resistencia óhmica, existe capacidad, la tensión se retrasa con respecto a la intensidad, o sea, existe un determinado defasaje entre ambas (ver Apéndice 2, nota 15).

Si acudimos a la representación vectorial, la impedancia resultante (en este caso la debida a la resistencia óhmica y a la capacitancia) ya no será horizontal, sino la suma vectorial de dos vectores perpendiculares: el de la resistencia y el de la capacitancia.

Veamos ahora lo que ocurre con las bobinas.

Al variar la corriente, varía el campo magnético producido por el conductor.

Si se trata de una corriente alterna, al cambiar el sentido de circulación de la corriente cambiará la dirección del campo magnético producido.



¿Cómo se comporta el material que rodea a la bobina?

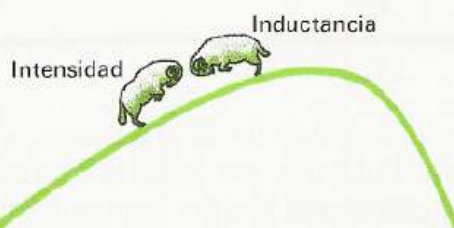
Dependerá de la clase de material de que se trate. Según sea un material ferromagnético, paramagnético o diamagnético, su comportamiento será diferente.

En cualquiera de los casos, no obstante, existirá una cierta interacción entre la corriente que recorre el circuito y la estructura interna del material, al igual que ocurría en el caso del condensador.

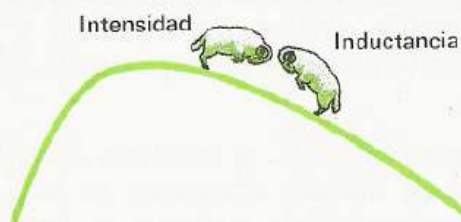
Si el material es ferromagnético, esta interacción será muchas veces más notoria que en los otros casos. Ello da lugar a interesantes aplicaciones de los núcleos de materiales ferromagnéticos.

Pero no todo el efecto se debe al material comprendido en el interior de la bobina. Al crecer la corriente que la recorre, aumentan de tamaño las líneas de fuerza del campo magnético y, cuando éstas llegan a adquirir un determinado tamaño, rodean a las otras espiras de la bobina. Este efecto se llama autoinducción de la bobina, y la consecuencia más importante es que, por el hecho de existir una bobina recorrida por una corriente alterna, dicha bobina presenta una reactancia inductiva o inductancia, que se opone a que existan cambios de intensidad en la corriente que recorre el circuito.

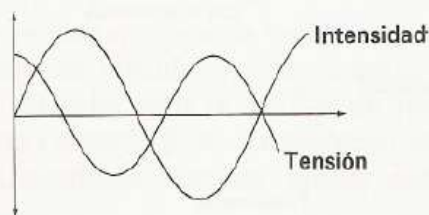
Si la intensidad tiende a aumentar, la inductancia de la bobina se opone.



Si la intensidad tiende a disminuir, la inductancia de la bobina se opone igualmente.



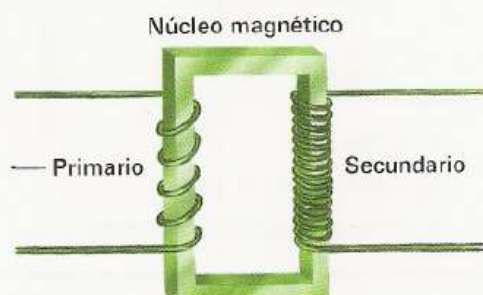
Volviendo otra vez al símil geométrico de la representación vectorial, resulta que la bobina también produce un defasaje entre la tensión y la corriente que recorre el circuito, ya que la intensidad se retrasa con respecto a la tensión (justamente lo contrario de lo que ocurría con la capacitancia).



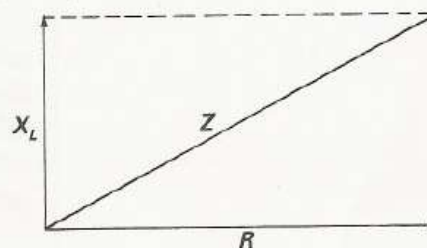
EL TRANSFORMADOR

El transformador consta de dos bobinados independientes dispuestos sobre un núcleo ferromagnético cerrado.

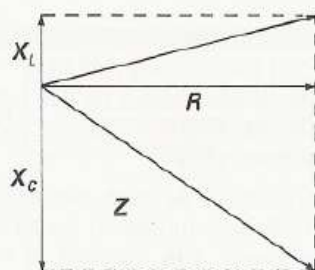
Las variaciones de flujo producidas por la primera bobina (primario) hacen que las líneas de fuerza que recorren el material ferromagnético cambien su intensidad y dirección.



Como consecuencia de ello, en la otra bobina se induce una corriente cuya tensión dependerá del número de espiras y cuya intensidad dependerá de la sección del hilo empleado.



**DIAGRAMA VECTORIAL
DE UN CIRCUITO RECORRIDO
POR UNA CORRIENTE ALTERNA**



Resultante = Z = impedancia

$$X_c = \frac{1}{2\pi\nu c}$$

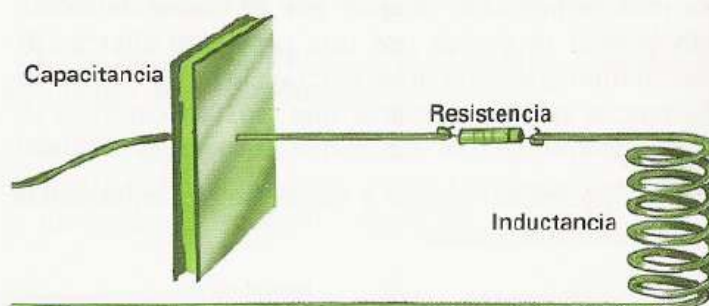
$$X_L = 2\pi\nu.$$

X_L crece cuando ν crece.

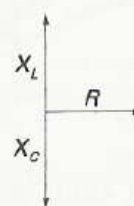
X_C disminuye cuando ν aumenta.

En general, en un circuito cualquiera recorrido por una corriente alterna existirán resistencia pura u óhmica, reactancia capacitiva o capacitancia y reactancia inductiva o inductancia.

Recordemos que, al variar la frecuencia de la corriente, varían las reactancias inductiva y capacitiva. La inductancia de una bobina crece cuando aumenta la frecuencia que la recorre. Lo contrario ocurre con la capacitancia, que disminuye cuando la frecuencia aumenta.

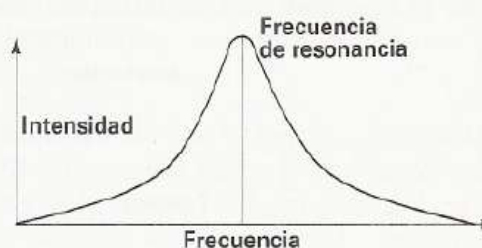


Existirá un valor de la frecuencia ν tal que la reactancia inductiva sea igual a la capacitiva. En este caso, como sus efectos son opuestos, se anulan (se trata de dos vectores iguales y opuestos), la impedancia total resultante será igual a la resistencia óhmica del circuito (que puede ser tan baja como deseemos), y la corriente que recorrerá el circuito será máxima.



Resultante = R = resistencia óhmica

A esta condición del circuito se la denomina **resonancia**.

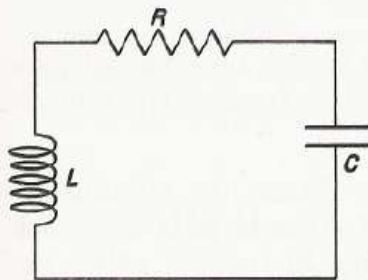


En resumen, pues, para todo circuito existe una frecuencia tal que la corriente que lo recorre tiene una intensidad máxima, y esa frecuencia se llama **frecuencia de resonancia**.

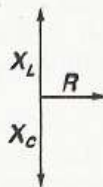
A un circuito formado por capacitancia y por inductancia se le llama **circuito resonante**.

Circuitos oscilantes

Cualquier circuito formado por una inductancia y por una capacitancia (e, inevitablemente, por una resistencia óhmica, ya que ésta siempre está presente en todos los conductores) será resonante para una determinada frecuencia, la frecuencia de resonancia.



Circuito oscilante



En la resonancia $X_L = X_C$
 $Z = \text{Impedancia} = R$

Cuando la corriente que recorre este circuito alcance la frecuencia de resonancia, las reactancias capacitiva e inductiva se anularán y la impedancia total del circuito será la debida a la resistencia óhmica.

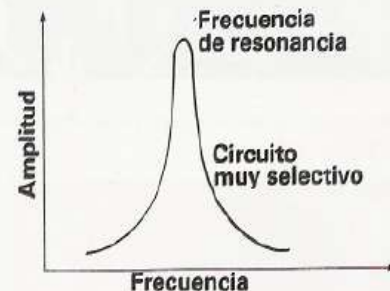
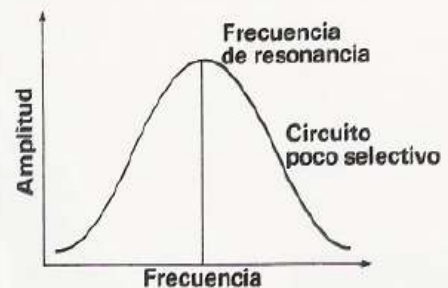
Si un circuito oscilante se construye con precaución para que su resistencia óhmica sea muy pequeña (lo cual se consigue fácilmente empleando conductores de muy buena conductividad y de gran sección), la intensidad de corriente que lo recorra, para la frecuencia de resonancia, será muy grande.

En estas condiciones el rendimiento del circuito será muy bueno. Ello quiere decir que las pérdidas en el circuito serán mínimas.

Es muy importante que la resistencia óhmica sea lo más pequeña posible, ya que, cuanto menor sea ésta, más estrecha será la gráfica de respuesta del circuito con respecto a las frecuencias; es decir, hablando en términos técnicos, mayor será su **selectividad**.

SELECTIVIDAD

La selectividad es la capacidad que tiene un circuito de comportarse como un filtro, es decir, de permitir el paso de la frecuencia a la que presenta resonancia e impedir el paso de otras frecuencias.



Corrientes de alta y baja frecuencia

La corriente que recorre un circuito oscilante es una corriente alterna, y la que empleamos industrialmente es también una corriente alterna.

¿Por qué unas corrientes pueden producir ondas electromagnéticas y otras no? Esta pregunta parece muy oportuna, ya que nunca hemos oído decir que las conducciones de energía eléctrica industrial radien energía al espacio en forma de ondas electromagnéticas.

No existe ninguna diferencia cualitativa entre las «altas» y las «bajas» frecuencias. Todas ellas corresponden a corrientes alternas de diferente longitud de onda.

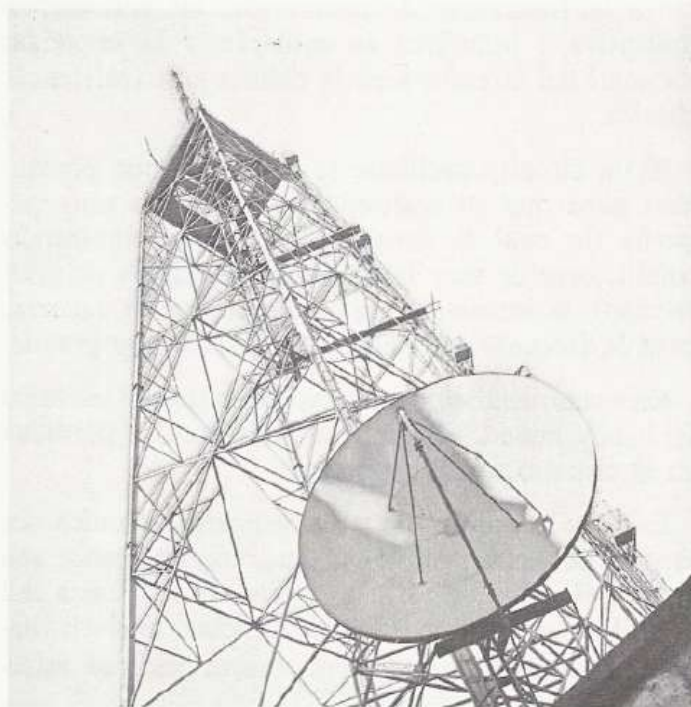
Entonces, ¿cómo es que sólo se observa radiación electromagnética en las altas frecuencias y no en las bajas?

Cuando las dimensiones físicas del circuito son comparables a la longitud de onda de la frecuencia de la corriente alterna que lo recorre, existe una parte determinada de la energía que se escapa del circuito en forma de radiación.



Antena receptora, empleada para recoger emisiones de radio y televisión.

Antena emisora de televisión que aprovecha su estructura metálica para la colocación de diferentes sistemas radiantes de energía electromagnética.



Cuando las dimensiones físicas del circuito son, por el contrario, mucho más pequeñas que la longitud de onda de la frecuencia empleada, tales pérdidas por radiación son tan minúsculas que permanecen inapreciables.

Por eso la distinción entre «altas frecuencias» y «bajas frecuencias» es bastante relativa. No existe un límite preciso entre ambas, y el único criterio para distinguirlas es que las **altas frecuencias son aquellas que tienden a escaparse del circuito, y las bajas frecuencias no manifiestan esta tendencia.**

Las primeras, que en el lenguaje técnico se denominan también **radiofrecuencias**, requieren que los circuitos donde se encuentran posean unas características especiales para evitar que esta energía se disipe inútilmente (tales requisitos son, esencialmente, apantallamientos metálicos o «blindajes»). Las segundas, o **audiofrecuencias**, no necesitan de estas precauciones, y los circuitos pueden ser como los demás circuitos eléctricos normales.

Radiación de energía electromagnética

Cuando una corriente alterna recorre un circuito cualquiera se aplica la ley de Ohm para corriente alterna, donde interviene el vector impedancia Z en sustitución de la resistencia R , que empleábamos en corriente continua, y todo ocurre como antes.

Con la corriente alterna se produce todo tipo de efectos, como el efecto Joule, igual que si se tratase de corriente continua.

Pero ¿qué ocurre si vamos aumentando la frecuencia cada vez más?

Esta pregunta se la hacían los científicos desde el siglo XVIII. Pero ninguno podía facilitar la respuesta, ya que era muy difícil aumentar la frecuencia de una corriente cada vez más, sobre todo si se empleaban sistemas mecánicos para producirla, tales como los alternadores.

Y está claro que no se podía aumentar la frecuencia cada vez más, porque existía un límite físico. La máquina se rompía si el alternador superaba la velocidad para la que había sido proyectado y construido.



Antena emisora de radiodifusión.



Heinrich Rudolf Hertz, descubridor de las ondas electromagnéticas, también llamadas ondas hertzianas.

Por otro lado, los físicos teóricos intuían que debería existir una forma de transmisión de energía ondulatoria que no necesitase de un medio material para propagarse por él. Esta necesidad surgía principalmente de la Óptica. Los científicos se preguntaban: ¿es la luz un fenómeno ondulatorio? Si lo es, ¿cómo se propaga por el vacío, donde no existe ningún medio material que pueda transmitirla?

Todos nosotros recibimos la luz del Sol, y sabemos que nos llega a través del vacío, donde no existe ningún medio material.

Sólo nos queda la duda de si la luz es o no un movimiento ondulatorio. ¡Claro que sí! Con la luz se pueden producir fenómenos como los de interferencias y de difracción; luego la luz es, con toda seguridad, un fenómeno ondulatorio, es decir, la luz está formada por ondas.

Ya tenemos dos hechos indudables y comprobados experimentalmente:

1. La luz está formada por ondas.
2. La luz se propaga por el vacío.

Experiencia de Hertz

Así estaba la situación de la ciencia, y así siguió hasta el año 1887, en que un hábil experimentador alemán, llamado Hertz, resolvió el problema demostrando que la luz era un fenómeno de naturaleza electromagnética, o sea, que la Óptica podía muy bien quedar englobada en el Electromagnetismo.

La revolución intelectual que ello supuso, así como sus repercusiones en la manera de pensar de toda la humanidad, han sido colosales.

El conocimiento de la naturaleza electromagnética de la luz y la existencia de ondas electromagnéticas que se pueden propagar de un sitio a otro sin ningún medio material han condicionado inmensamente la vida en el siglo XX, y sin duda ejercerán enorme influencia en los siglos venideros.

Es tan importante el desarrollo de las ideas científicas sobre el Electromagnetismo que merece la pena que le dediquemos una breve reseña histórica.

Antecedentes históricos

Hasta el experimento de Oersted (realizado en 1820) el Magnetismo y la Electricidad eran dos cosas independientes.

Desde 1820 en adelante quedó demostrado que la Electricidad y el Magnetismo son manifestaciones distintas de un único fenómeno. Ya hemos visto que un campo magnético variable engendra la aparición de una corriente en una espira. Resulta que, de acuerdo con la ley de Ohm, para que exista una corriente en un conductor deberá necesariamente existir un campo eléctrico en dicho conductor. Así es, efectivamente. Existe un campo eléctrico que siempre es perpendicular al campo magnético que lo ha producido.

Pero resulta que el campo magnético variable produce siempre un campo eléctrico perpendicular a él, exista o no un conductor.

Ello significa que si, intentando imitar a Faraday, construyésemos una bobina de hilo no conductor, formada por muchas espiras de seda o de fibra de vidrio, por ejemplo, seguiría existiendo un campo eléctrico que estaría ligado a las variaciones del campo magnético.

La resistividad de estos materiales dieléctricos es tan grande (o, lo que es lo mismo, su conductividad es tan pequeña) que, según la ley de Ohm, la corriente que los pudiera recorrer sería totalmente imperceptible. Como experimentadores deberíamos reconocer nuestro fracaso.

Al fin y al cabo ¿a quién le puede interesar la existencia de un campo eléctrico en un dieléctrico, o en el vacío, que no puede producir ninguna corriente? ¿Podría tener alguna aplicación práctica este campo eléctrico?

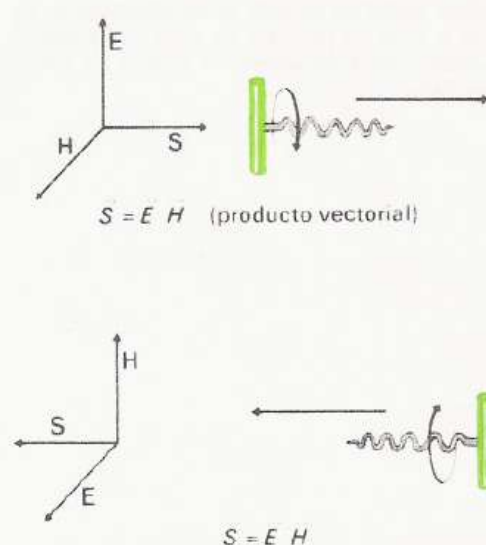
Recapitando un poco, pensemos una cosa: si la variación de un campo magnético produce la aparición de un campo eléctrico, ¿producirá ese campo eléctrico la aparición de otro campo magnético? Sí, y ello es el fundamento de las ondas electromagnéticas, sin las cuales no existirían la radio ni la televisión (ni la luz del Sol siquiera, lo cual sería mucho más lamentable).



Gracias a las ondas hertzianas es posible comunicarse a distancia sin ningún medio material, como ocurre en el caso de la comunicación entre la torre de control y un avión. En la foto, la moderna torre del aeropuerto Charles de Gaulle, de París.

EL VECTOR DE POYNTING

El vector de Poynting es un concepto matemático basado en una entidad matemática también, llamada producto vectorial. El vector de Poynting es el producto vectorial de los vectores $\vec{E}$ y $\vec{H}$, y se define como otro vector perpendicular a los dos anteriores y cuya dirección y sentido se determinan llevando el primero al segundo por el camino más corto y aplicando la regla del sacacorchos:



En efecto, los campos eléctricos y magnéticos están estrechamente relacionados. Uno produce al otro, y el otro reproduce al primero, en cualquier medio conductor o dieléctrico, o incluso en el vacío.

Como ya hemos visto, el campo eléctrico y el magnético son siempre perpendiculares entre sí. Para que se reproduzcan el uno al otro debemos imaginar la existencia de un vector perpendicular a ambos campos y dirigido precisamente en la dirección de propagación.



A este vector se le llama **vector de Poynting**, y se le representa como $\vec{S}$.

Todo lo que estamos contando no es más que una elucubración teórica. De hecho, todo esto y mucho más estaba previsto ya teóricamente desde 1873 por un físico-matemático llamado James Clerk Maxwell. Este científico elaboró unas ecuaciones matemáticas que explicaban teóricamente la existencia de una propagación por ondas de la energía electromagnética, tanto en conductores como en dieléctricos.

Las ecuaciones de Maxwell explicaban no sólo la existencia de estas presuntas ondas electromagnéticas, sino también su velocidad de propagación en el vacío, que resultaba ser de unos 300.000 km/s. ¡Asombrosamente, esa velocidad era la misma que la de propagación de la luz, determinada en varias ocasiones por métodos astronómicos!

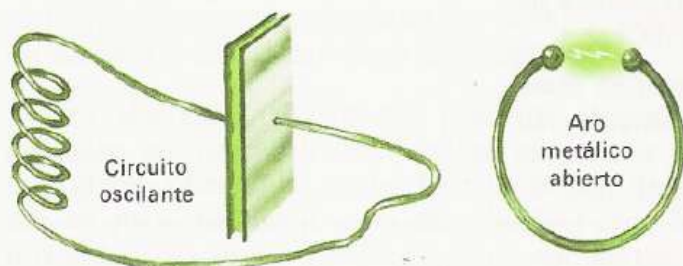
No obstante, la gran mayoría de los científicos de aquella época pensaban que eso era una casualidad. Nadie creía que las ecuaciones de Maxwell, y toda su teoría electromagnética, pudieran ser algo más que una bonita sinfonía matemática, de gran belleza académica, pero sin ninguna utilidad práctica.

Para que la teoría electromagnética de Maxwell se convirtiese en una doctrina aplicable a la realidad faltaba la demostración experimental de la existencia de las ondas electromagnéticas.

Desgraciadamente, esta demostración experimental tardó varios años en llegar.

Y llegó, por fin, en la Escuela Técnica de Karlsruhe (Alemania), en el año 1887. El profesor Heinrich Rudolf Hertz estaba experimentando con un circuito oscilante, cuando se le ocurrió unir unos alambres a las dos ramas del circuito (¡la primera emisora de radio!).

A unos cuantos metros de distancia dispuso un aro metálico con sus extremos abiertos.



Hertz observó que, al producir **oscilaciones amortiguadas** en el circuito oscilante, saltaba una pequeña chispa entre los extremos del aro metálico. La chispa no se producía en todas las ocasiones. Había lugares donde no aparecía, y había otros lugares donde era muy grande. Hertz pudo detectar la chispa en el aro metálico hasta una distancia de unos cuantos metros.

Todo ocurría como si el circuito oscilante produjese una radiación de un tipo desconocido que se podía detectar con el aro metálico. Además, todo parecía indicar que la velocidad de propagación de esas misteriosas ondas era muy grande, ya que no se observaba retraso alguno entre el momento de producción de la oscilación y la aparición de la chispa en el aro.

Podríamos pensar que este experimento se parece mucho al de Faraday. En parte sí, ya que por el circuito oscilante circula una corriente que produce un campo magnético, y la variación de ese campo magnético determina la aparición de un campo eléctrico inducido.

Las oscilaciones amortiguadas son aquellas cuya amplitud decrece rápidamente con el tiempo. Si la amplitud se mantiene constante se llaman **ondas entretenidas**. Precisamente las ondas que utilizó Hertz eran amortiguadas.

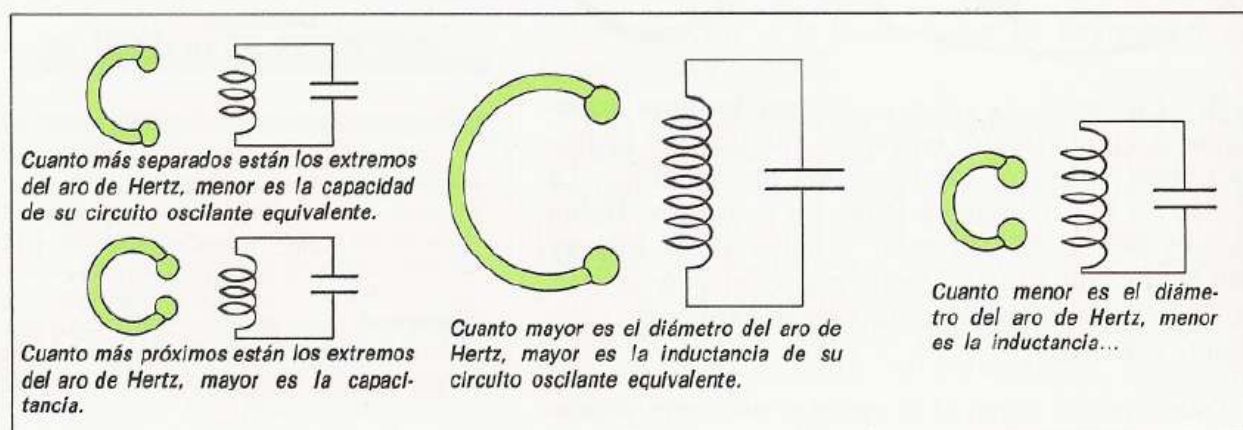
TRENES DE ONDAS

Hertz producía sus oscilaciones electromagnéticas descargando una chispa en el circuito. Por cada oscilación se producían unos cuantos ciclos de la corriente alterna, separados unos de otros. En Física, estos trozos de onda sinusoidal se denominan **trenes de ondas**. Estos trenes de ondas se amortiguaban rápidamente, es decir, su amplitud decrecía muy de prisa.



La diferencia es, ante todo, cuantitativa. Con el valor de la intensidad de corriente que Hertz empleaba en su circuito oscilante no se hubiese podido detectar ninguna tensión inducida a una distancia de tantos metros. Por otro lado, si se modificaba la forma y tamaño de la espira receptora (llamada aro de Hertz, y que todavía se emplea en la actualidad), los resultados variaban grandemente. Existían unos tamaños determinados del aro con los cuales la chispa era muy ostensible. Hertz pudo comprobar que la chispa originada era máxima cuando el aro estaba en resonancia con la frecuencia de la señal producida en el circuito oscilante.

Pero ¿cómo puede un simple aro metálico estar en resonancia? ¿Dónde están su inductancia y su capacitancia?



En realidad, un simple conductor metálico abierto, tenga forma de aro o no, posee una inductancia propia, y entre sus extremos existe una capacitancia también propia. Cualquier conductor equivale, pues, a un circuito oscilante, y existirá una frecuencia tal que el conductor resonará en ella y se quedará imperturbable ante otras frecuencias diferentes.

Hertz era un científico escrupuloso y concienzudo. ¿Era ésa la explicación, o existía otra diferente que él no conocía?

Antes de aventurarse a dar por definitiva esta explicación hizo otras muchas observaciones experimentales.

En primer lugar cambió la frecuencia de resonancia del circuito oscilante (hoy lo llamaríamos transmisor) y modificó el aro metálico (que hoy se llama

maría receptor) de manera conveniente, y pudo comprobar que, efectivamente, existía una correlación entre la frecuencia de resonancia del circuito productor de ondas y la de resonancia del aro metálico. Indudablemente se trataba de ondas electromagnéticas. ¡La ciudad de Karlsruhe fue el primer lugar del mundo donde el hombre produjo voluntariamente ondas electromagnéticas!

El acontecimiento fue trascendental. Quedaba demostrado que la teoría de Maxwell era correcta y, al mismo tiempo, se abría una puerta hacia nuevos caminos de comunicación entre los pueblos, salvando tiempos y distancias entre los hombres.

Pero Hertz era sumamente prudente. Antes de anunciar su descubrimiento quiso asegurarse de que, efectivamente, las ondas hertzianas (así llamadas en justo homenaje a su descubridor) eran las mismas ondas previstas teóricamente por Maxwell. Para que lo fuesen deberían producir los mismos fenómenos que las ondas luminosas, es decir, deberían presentar interferencias, difracción, polarización, etc.

Hertz pudo comprobar que así ocurría. Construyó un gran prisma de brea y observó que las ondas electromagnéticas que pasaban a través de él sufrían una dispersión, totalmente comparable a la que sufre la luz solar al pasar por un prisma de vidrio.

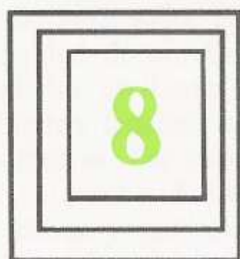
También consiguió polarizar las ondas electromagnéticas haciéndolas pasar por una rejilla metálica. Construyó grandes lentes de materiales dieléctricos y observó que las ondas hertzianas se refractaban al atravesarlas, lo mismo que la luz, y se reflejaban en una superficie metálica, de la misma forma que la luz en un espejo.

¡Qué inmensa alegría! No sólo se obtenía un medio muy útil y muy prometedor para que la técnica lo aplicase a nuevos descubrimientos, sino que se comprobaba experimentalmente la exactitud y corrección de la formulación matemática de la teoría electromagnética de Maxwell.

Con ello quedaba definitivamente demostrada la naturaleza electromagnética de la luz, lo cual cerraba un largo capítulo de incertidumbre sobre la Óptica tradicional.

ONDAS HERTZIANAS

Hubiese resultado igualmente razonable llamarlas «ondas maxwellianas», ya que también es muy digna de encomio la labor de Maxwell, que, únicamente armado de un lápiz y papel, desarrolló una impecable teoría matemática y predijo la existencia de estas ondas, así como sus propiedades más destacadas, con una sorprendente exactitud.



LA ENERGIA RADIANTE. LA LUZ

La energía electromagnética se propaga en el vacío

Tal como Maxwell había previsto, y tal como Hertz había demostrado, la energía electromagnética se puede transmitir por el vacío en forma de ondas.

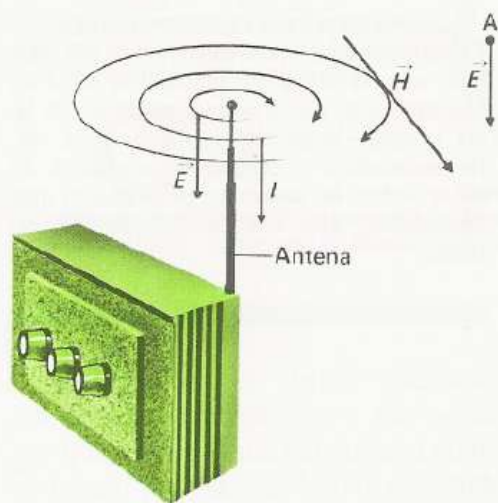
¿Cuál es el mecanismo de formación y propagación de las ondas hertzianas?

En primer lugar, en el circuito oscilante del transmisor se producen unas corrientes alternas de muy alta frecuencia que determinan la producción de un campo magnético que varía de magnitud y sentido muchas veces por segundo.

Ese campo magnético determina la aparición de un campo eléctrico que está estrechamente asociado a él, y que varía a su misma frecuencia. Dicho campo eléctrico aparece siempre que exista una variación del campo magnético (y lo hace en toda ocasión, haya un conductor o un dieléctrico en el punto en cuestión).

Si tenemos un transmisor, éste producirá una corriente de intensidad I que recorrerá la antena. Dicha corriente producirá la aparición de un campo magnético $\vec{H}$ perpendicular al campo $\vec{E}$. En el punto A aparecerá un campo eléctrico $\vec{E}$ perpendicular al campo magnético.

Si en el punto A existe un conductor, este campo $\vec{E}$ determinará la aparición de una corriente (como observó Faraday en su experimento). Si en el punto A existe un dieléctrico, no aparecerá ninguna corriente, pero sí existirá un campo eléctrico $\vec{E}$. Este campo eléctrico que está en el vacío, sin



En la antena, I lleva la misma dirección que el campo eléctrico E .

necesidad de ningún soporte material, reproduce otra vez el campo $\vec{H}$, que a su vez vuelve a reproducir el campo eléctrico $\vec{E}$.

Si solamente existiese el vacío, los campos eléctricos y magnéticos se irían produciendo uno al otro, ilimitadamente. Es decir, una vez producida una señal electromagnética, ésta se propaga indefinidamente y nunca se acaba.

Por esta razón podemos observar la luz de estrellas muy lejanas que en la actualidad no existen. Cuando existían, produjeron la luz que hoy nos llega a nosotros. Después desaparecieron, pero la luz se continuó propagando a lo largo de todo el Universo, y lo seguirá haciendo durante mucho tiempo.

Propagación de la energía radiante

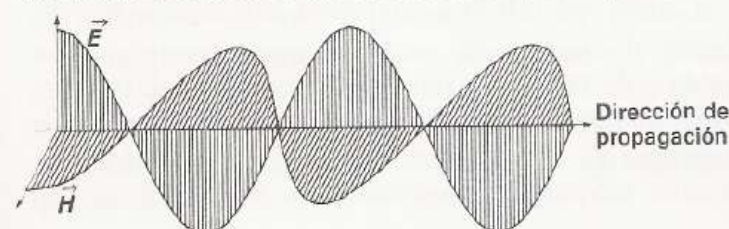
La existencia de una corriente eléctrica variable en un punto original determina la aparición de campos magnéticos y eléctricos que se reproducen el uno al otro sin necesidad de que exista ninguna materia por medio.

Estos campos se van alejando del punto original con una velocidad de 300.000 km/s (que es la misma que la de la luz), y lo hacen en todas direcciones por igual. Por eso los extremos de los vectores eléctricos y magnéticos están situados en superficies esféricas concéntricas (como las capas de una cebolla) cada vez más alejadas del punto original.

Las ondas electromagnéticas u ondas hertzianas se propagan, pues, en forma de ondas esféricas.

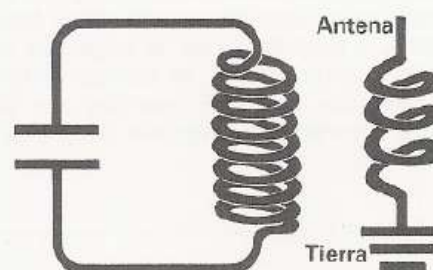
Pero ¿cómo son las ondas electromagnéticas «en la intimidad»?

Se trata de ondas **transversales**, es decir, que se propagan perpendicularmente a la dirección de la variación del campo (de los dos campos $\vec{E}$ y $\vec{H}$).



LA TRANSMISION DE LAS ONDAS HERTZIANAS

El circuito de antena también se puede acoplar capacitivamente al circuito oscilante. Sin embargo, lo más frecuente es emplear el acoplamiento inductivo, acercando una bobina de pocas espiras a la bobina del circuito oscilante.



La inducción mutua entre las dos bobinas se produce gracias a su proximidad física y a que las variaciones de flujo de una de ellas inducen unas corrientes en la otra.

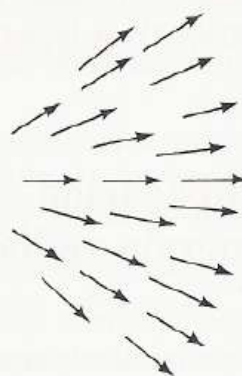
FOTOSÍNTESIS

La energía electromagnética procedente del Sol llega a nosotros, pero nuestra tecnología es incapaz de aprovecharla. Las humildes plantas, sin embargo, la aprovechan sintetizando sustancias orgánicas imprescindibles para la vida a partir del agua, del oxígeno, del anhídrido carbónico y de la energía solar. Este proceso se llama **fotosíntesis**, y además de ser el origen de la vida en nuestro planeta, es también el origen de todas las demás energías que el hombre aprovecha (a excepción de la energía nuclear).



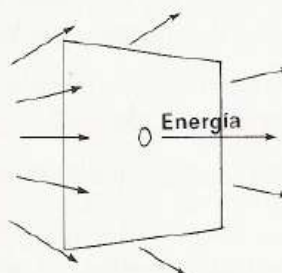
La dirección de propagación, perpendicular a la de los dos campos, coincide con la de un vector teóricamente previsto por Maxwell, y que se llama vector de Poynting $\vec{S}$.

Podemos resumir el proceso y representar los vectores de Poynting. En todo punto del espacio los vectores de Poynting llevan la dirección de los radios de una esfera cuyo centro coincide con el transmisor. Naturalmente, las superficies que unen los puntos de todos los vectores de Poynting son superficies esféricas concéntricas. Esta representación vectorial nos resulta familiar.



Podemos hablar de flujo del vector de Poynting. El concepto de flujo es una abstracción matemática, y el vector de Poynting es también un ente matemático abstracto.

Pero, si tanto el vector de Poynting como su flujo son conceptos imaginarios, ¿para qué los queremos?



Flujo del vector de Poynting = Energía

Resulta que el flujo del vector de Poynting, es decir, el número de vectores que atraviesan una unidad de superficie colocada perpendicularmente, coincide con la energía que atraviesa esa superficie. Y la energía es una magnitud real y concreta cuyos efectos se pueden determinar y medir.

Características de las ondas electromagnéticas.

Frecuencia y longitud de onda

La presencia de un campo magnético variable da lugar a la aparición de otro campo eléctrico variable. Este origina a su vez otro campo magnético variable, y el proceso se continúa indefinidamente.

Según eso, parece que todas las ondas electromagnéticas deberían ser iguales, pues su origen es el mismo en todos los casos.

Sin embargo, la corriente variable que recorre el electrodo emisor (antena) puede ser más o menos fuerte. Ello dará lugar a una onda electromagnética más o menos potente (o, lo que es lo mismo, a que el vector de Poynting sea más o menos grande).

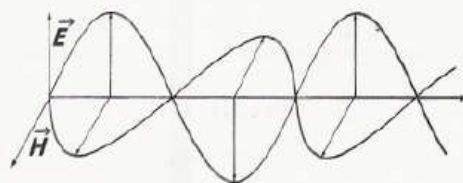
Pero también influye otro factor, y es la velocidad con la que la corriente de la antena cambia su sentido. Esta velocidad es la misma con la que la corriente alterna que recorre el circuito oscilante del transmisor cambia su polaridad. Ya hemos visto que esta característica de una corriente alterna se llama su **frecuencia** y que se mide en ciclos, kilociclos o megaciclos por segundo (c/s, kc/s, Mc/s).

La velocidad con la que la onda electromagnética se propaga por el vacío es siempre la misma, independientemente de la frecuencia que tenga. Dicha velocidad de propagación es de 300.000 km/s.

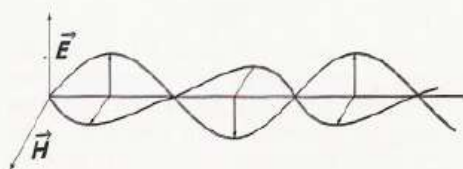
Es lógico pensar que cuanto más alta sea la frecuencia del transmisor, más juntos estarán los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos. Así ocurre, en efecto.

Hay que tener en cuenta que los campos $\vec{E}$ y $\vec{H}$ se están desplazando en el sentido de la propagación de la onda (hacia la derecha, en el caso de la figura) y que sus valores están pulsando (o, como se dice en lenguaje técnico, oscilando) entre un valor máximo y un valor mínimo igual a 0, precisamente a la velocidad impuesta por la frecuencia de la corriente alterna que recorre el circuito oscilante.

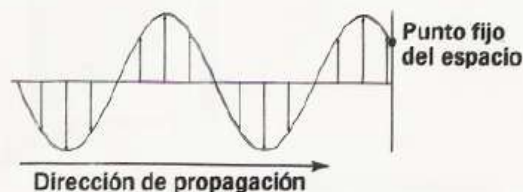
Si representásemos lo que ocurre en un punto fijo del espacio, veríamos pasar por él una onda sinusoidal que sería la envolvente de los vectores del campo $\vec{E}$ (y otra, perpendicular a la anterior, que sería la envolvente de los campos $\vec{H}$).



Alta frecuencia: los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos están muy juntos.



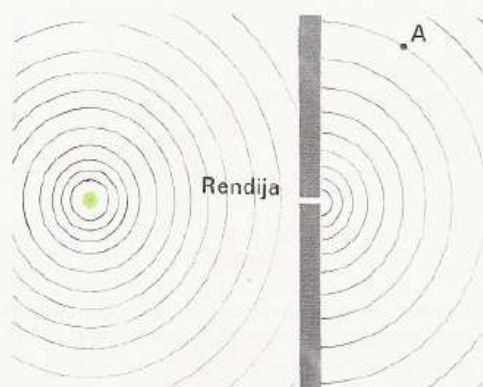
Baja frecuencia: los valores máximos de los campos eléctricos y magnéticos están más separados.



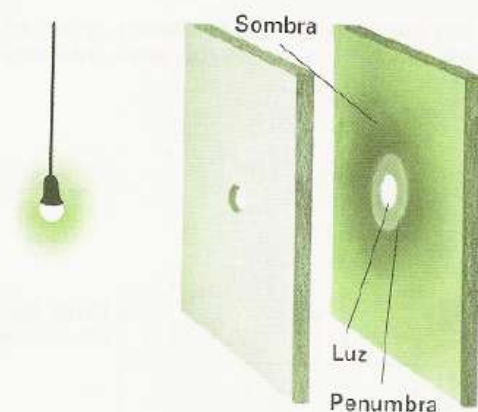
DIFRACCION

La difracción es un fenómeno físico que siempre va asociado a los fenómenos ondulatorios. Se puede definir diciendo que «cada punto alcanzado por una onda se convierte en el centro de producción de nuevas ondas».

Podemos ver, por ejemplo, la difracción que se produce detrás de un tabique en un estanque y observar que aparecen ondas al otro lado del tabique en puntos que no podrían ser alcanzados por la onda original (punto A).



Lo mismo ocurre, aunque en menor escala, con la luz. Detrás de una rendija muy fuertemente iluminada solamente deberían aparecer luz y sombra. Sin embargo, debido a la difracción, entre la luz y la sombra aparece una zona de penumbra.



A la distancia entre dos puntos en que el vector E alcanza dos valores máximos (o mínimos) consecutivos se la denomina **longitud de onda** y se la suele representar con la letra griega λ (lambda).

La frecuencia y la longitud de onda están estrechamente asociadas. Como ya sabemos que la velocidad de propagación (que se suele designar por la letra c) es constante e igual a 300.000 km/s, la relación que liga ambas magnitudes es:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \nu$$

donde T = período; o lo que es lo mismo:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

donde ν (otra letra griega llamada nü) representa la frecuencia en ciclos por segundo. La velocidad de la luz viene expresada en metros por segundo, es decir, $c = 300.000.000$ m/s, o sea, $3 \cdot 10^8$ m/s. En estas condiciones la longitud de onda se expresará en metros.

Con esto queda, pues, caracterizada una onda electromagnética. Todos estamos acostumbrados a escuchar las emisoras de radio y sabemos que éstas quedan identificadas por una frecuencia de «tantos kilociclos», equivalente a una longitud de onda de «tantos metros».

ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Como hemos visto, la frecuencia (o la longitud de onda) define una onda electromagnética u onda hertziana. También sabemos que la luz es una onda electromagnética. Pero resulta que hay luces de diferentes colores. ¿Existen «colores» peculiares asociados a cada frecuencia? Sí, y algunos de ellos los podemos apreciar directamente con nuestros sentidos, como ocurre con la luz; pero hay muchas otras ondas electromagnéticas de frecuencias más altas y más bajas que las de la luz que no podemos detectar directamente.

Cada onda electromagnética tiene, aparentemente, unas propiedades distintas que varían según sea de grande o de pequeña su longitud de onda. Todas ellas son, no obstante, una misma cosa. Con todo rigor podemos decir que cualquier onda electromagnética es una «luz» (lo que ocurre es que nuestros ojos son ciegos para casi todas ellas, excepto para la luz visible) o que cualquier onda electromagnética es una emisión procedente de una emisión de radio. Los receptores de radio que podemos construir solamente podrán captar una determinada gama de longitudes de onda, y permanecerán «ciegos» para todas las demás.

Cualquier onda electromagnética manifestará propiedades ondulatorias, pero estas propiedades nos parecen muy diferentes, según la longitud de onda.

Por ejemplo, para todos nosotros es un fenómeno familiar que la luz se propague en línea recta. Pero también nos resulta familiar que podamos recibir programas de radio procedentes de países muy alejados.

¿Por qué ocurre esto? En realidad la luz no se propaga rigurosamente en línea recta. Es capaz de rodear pequeños obstáculos, como saben muy bien los físicos que experimentan con la **difracción**.

La Tierra sería un obstáculo demasiado grande para la luz visible, pero no lo es para determinadas ondas de radio de gran longitud de onda. Todas las ondas electromagnéticas son capaces de sufrir difracción, pero, según su longitud de onda, unas lo harán con obstáculos más grandes que otras. La diferencia de comportamiento no es, pues, cualitativa, sino que se debe al tamaño relativo que exista entre la longitud de onda y los demás objetos materiales.

En realidad, Hertz ya empleó ondas de muy corta longitud de onda (alrededor de 1 metro); por eso pudo percibir sus propiedades ondulatorias y aplicar las ecuaciones de Maxwell. Si hubiese experimentado con frecuencias más bajas, es decir, con longitudes de onda muy largas (mucho más que las dimensiones del laboratorio), sus observaciones no hubiesen sido tan provechosas, y es muy posible que gran parte de las propiedades de las ondas recién descubiertas hubiesen quedado ignoradas.



Las ondas de radio pueden recorrer trayectorias curvas.



La luz solamente se propaga en línea recta.

TIPOS MAS COMUNES DE RADIACION ELECTROMAGNETICA

En principio, una onda puede tener una frecuencia muy baja o muy alta. En estas ilustraciones se representan simbólicamente los tipos de radiación electromagnética más comunes, desde las frecuencias más bajas hasta las más elevadas.



Los valores numéricos representados en las figuras son las frecuencias de las ondas electromagnéticas correspondientes, medidas en c/s, kc/s o Mc/s, hasta la luz infrarroja. Al hablar de luz, o de radiaciones electromagnéticas de frecuencias más elevadas, suele ser costumbre referirse a ellas en función de la longitud de onda, ya que en el caso de la frecuencia, al ser muy alta, necesitaríamos emplear unas cantidades muy grandes.

Como las longitudes de onda son muy pequeñas, no se miden en metros (ocurriría lo contrario que antes, que habría que emplear cantidades muy pequeñas). Por eso se expresan en **angstroms** (abreviadamente Å), que es una unidad de longitud equivalente a 10^{-8} cm .

Producción de ondas electromagnéticas. Osciladores

Las ondas hertzianas están producidas por un circuito oscilante y una antena unida a él. **La fuente de energía electromagnética radiante es una corriente alterna de alta frecuencia que recorre el circuito oscilante.**

Pero ¿cómo se produce esta corriente alterna? Si miramos el dibujo del espectro electromagnético, veremos que una frecuencia de las utilizadas normalmente en la radio es de 1 Mc/s (o, expresado de otra forma, de 1 megahertzio = 1 MHz) o sea, de un millón de ciclos por segundo. Esta frecuencia no se puede obtener de un alternador, ya que éste tendría que girar a ¡60 millones de revoluciones por minuto! No se puede fabricar ningún alternador giratorio que produzca esta frecuencia tan elevada. Ningún material podría resistir los esfuerzos mecánicos a que estaría sometido.

Sin embargo, existen frecuencias utilizables todavía mucho más altas. La televisión trabaja con frecuencias de, aproximadamente, 200 MHz, el radar con frecuencias de 10.000 MHz, y los rayos X con frecuencias todavía más altas. Es evidente que para producir estas oscilaciones de tan altas frecuencias hay que recurrir a unos dispositivos especiales llamados **osciladores**.

Volviendo al ejemplo de la emisora de radio, si tenemos que producir una corriente alterna de 1 MHz debemos acudir a un oscilador. El oscilador está formado por un condensador y una bobina (que constituye un circuito oscilante que determina la frecuencia de la onda y que a su vez es igual a la frecuencia de resonancia) y un dispositivo que regula el paso de energía del condensador a la bobina, y viceversa.

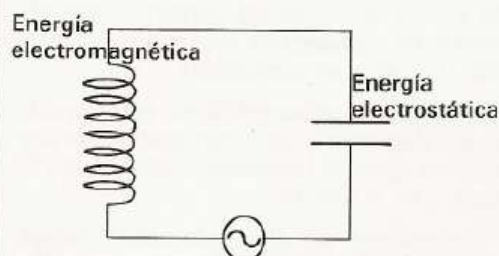
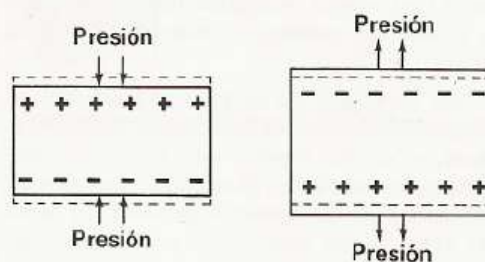
Este dispositivo actúa como una válvula y puede ser una válvula termoiónica, un transistor o cualquier otro dispositivo llamado elemento activo, de cuyo estudio se ocupa la Electrónica.

Ya hemos visto cómo se puede acumular una cierta energía en la bobina, merced a su autoinducción. También hemos visto que el condensador puede almacenar energía en las moléculas de un dieléctrico.

CRISTAL DE CUARZO

Es muy importante que la frecuencia de un circuito oscilante se mantenga lo más exacta posible, ya que de otra manera el receptor no podría recibir el mensaje transmitido. Además, si se permite que varíe la frecuencia del circuito oscilante, se producen interferencias en otras frecuencias utilizadas por otras estaciones.

Para estabilizar la frecuencia de los osciladores se emplea un elemento llamado «cristal de cuarzo», que presenta la propiedad de ser piezoeléctrico. **La piezoelectricidad es la propiedad que presentan algunas sustancias de producir cargas eléctricas variables al aplicarles una presión también variable.** Como la frecuencia de resonancia de un trozo de cuarzo (o de cualquier otra sustancia piezoeléctrica) solamente depende de su forma geométrica y de su tamaño, se pueden obtener oscilaciones sumamente estables.



LA PRIMERA EMISORA DE RADIO

Los experimentos de Hertz únicamente eran considerados como una curiosidad de laboratorio. Hertz y muchos otros científicos estaban interesados únicamente en investigar su naturaleza.

No obstante, no faltaron otros técnicos que pensaban en la aplicación de las ondas electromagnéticas a la comunicación a grandes distancias.

Un científico ruso llamado Popov añadió un conductor al oscilador de Hertz y lo extendió en el aire, al mismo tiempo que unía a tierra otro conductor, enterrándolo en el suelo.

Así consiguió aumentar notablemente el alcance de las ondas hertzianas. Popov fue, pues, el primer técnico que añadió una antena a un oscilador, obteniendo con ello la primera estación emisora de radio. La fama ha sido injusta con Popov y atribuye todo el mérito a Marconi.

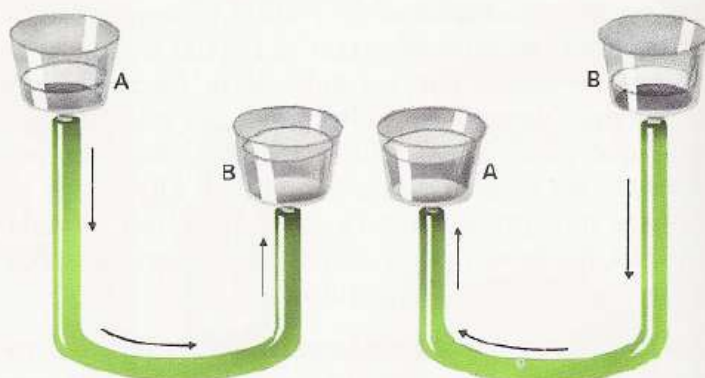
En realidad, todos ellos formaron una especie de equipo de trabajo donde cada uno desempeñó una función definida. Comparándolos con una empresa moderna, diríamos que Hertz fue el científico investigador, Popov el ingeniero que desarrolló el invento y Marconi el técnico comercial que encontró las aplicaciones que el invento ofrecía al mundo contemporáneo.

Una de las aplicaciones de este invento quedó demostrada en circunstancias tan dramáticas como el hundimiento del buque «Titanic», en el año 1912.

Por primera vez el mundo entero estuvo pendiente de las noticias del desastre en el mismo momento que éste se produjo, al ser aquéllas transmitidas desde el buque siniestrado.

Disponemos, así, de dos depósitos donde se puede almacenar la energía eléctrica. Ocurre algo similar a un sistema formado por dos vasijas unidas por un tubo flexible y conteniendo una cierta cantidad de líquido.

Si una de las vasijas está más alta que la otra, el líquido se dirigirá de la más alta a la más baja. Cambiando entre sí la posición relativa de las dos vasijas, el líquido circulará en dirección contraria. En efecto, en el dibujo de la izquierda, el líquido circula de A a B, y en el de la derecha de B a A.



Cuanto más de prisa se muevan las vasijas, más de prisa cambiará de dirección el movimiento del líquido.

Lo mismo ocurre con el circuito oscilante, donde la bobina posee una inductancia, que es la capacidad de almacenar energía magnética, y el condensador una capacitancia, que es su capacidad de almacenamiento de energía electrostática.

Si las vasijas con líquido son muy grandes, su tamaño limita la rapidez con que puede cambiar de sentido la circulación del líquido. Es obvio que cuanto más líquido contengan, más tardará éste en pasar de una vasija a otra.

Lo mismo ocurre con el circuito oscilante. Cuanto mayor sea su capacitancia e inductancia, mayor cantidad de energía podrá almacenar y más tiempo tardará en desplazarse de un lado a otro. Por eso, para producir frecuencias altas, hay que utilizar condensadores de poca capacitancia y bobinas de poca inductancia. **Cuanto más alta sea la frecuencia que deseamos obtener, menores deberán ser la capacitancia y la inductancia utilizadas.**

La frecuencia de la corriente producida en el circuito dependerá de ambos valores, capacitancia e inductancia, y cualquier pequeña variación de éstos determinará inmediatamente una variación en la frecuencia de la corriente generada.

Hasta ahora solamente hablamos de corriente alterna. Las ondas electromagnéticas se producen en el seno del circuito oscilante, pero como la energía, bien sea en forma electrostática o magnética, solamente va del condensador a la bobina y de la bobina al condensador, parece que se queda limitada dentro del circuito. Así ocurre, en efecto. Existe una radiación, una parte de la energía que se escapa del circuito y que se propaga en forma de ondas hertzianas.

A veces este fenómeno es indeseable; en este caso lo que se hace es apantallar electrostáticamente (es decir, se rodea el circuito de una chapa metálica) el circuito oscilante. Así se confina la energía, evitando que salga del circuito. Esta precaución es especialmente importante, sobre todo cuando las dimensiones del circuito son del mismo orden que la longitud de onda de la frecuencia producida. Ya sabemos que, en este caso, la parte de energía radiada al exterior en forma de ondas será máxima.

Antenas

Otras veces (como ocurre en las emisoras de radio o de televisión) lo que interesa precisamente es que se radie al exterior la mayor cantidad posible de energía. Entonces hay que procurar canalizar dicha energía y conducirla al exterior.

Este circuito secundario se llama circuito de antena, y se suele acoplar inductivamente a la bobina.

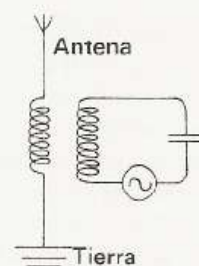
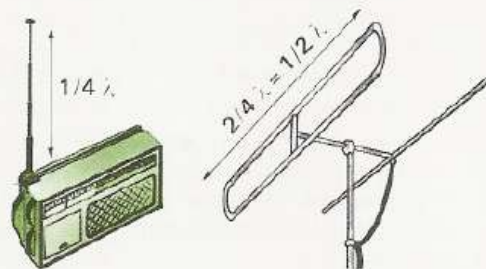
Para que la energía radiada sea máxima, interesa que la antena esté lo más separada posible de la tierra. Así existirá más contacto con el aire (que es el medio donde se propagará la onda). También es conveniente que la antena sea lo más larga posible, pero existen longitudes de antena que dan mejores resultados que otras para una misma frecuencia.

La tierra se considera como un buen conductor, y se emplea siempre como electrodo común entre las estaciones emisoras y receptoras.

LA ANTENA

En realidad, la antena forma parte del circuito resonante, y su dimensión óptima debe ser de un múltiplo de la cuarta parte de la longitud de onda empleada, si se desea obtener unos resultados eficaces. En las antenas verticales se suele emplear una longitud igual a la cuarta parte de la longitud de onda (por eso se llama de cuarto de onda).

En otros tipos de antenas (como los dipolos plegados que se emplean en televisión) se suele emplear una longitud igual a la mitad de la longitud de onda utilizada.



HISTORIA DE LA RADIO. PRIMERAS INVESTIGACIONES

Cuando Hertz observó la aparición de ondas electromagnéticas, su sorpresa fue mayúscula. Inmediatamente se dedicó a estudiar su naturaleza y sus propiedades. Pero Hertz era, ante todo, un científico. Su principal preocupación residía en comprobar si estas ondas eran las mismas que las predichas por la teoría de Maxwell.

Por otra parte, su dispositivo experimental era muy rudimentario. Su circuito oscilante estaba construido con elementos improvisados y la frecuencia de la onda electromagnética estaba controlada por un dispositivo mecánico.

No le ocurría lo mismo a Guillermo Marconi, que estaba muy interesado en aplicar las ondas hertzianas recién descubiertas a una comunicación inalámbrica a distancia (se llamaba inalámbrica porque no existía ningún conductor que uniese el transmisor y el receptor, a diferencia de lo que ocurría con el telégrafo ordinario).

Marconi realizó diversos ensayos, y el primer éxito lo obtuvo en 1899. ¡Buena manera de entrar en el siglo XX! En aquella ocasión consiguió transmitir mensajes telegráficos a través del canal de la Mancha, salvando una distancia de más de veinte kilómetros.

El descubrimiento de Hertz abría unas posibilidades extraordinarias. Pensemos en lo lentas y costosas que eran las comunicaciones en aquella época. El país que dispusiese de una red de comunicaciones inalámbricas a larga distancia, prácticamente instantáneas (ya que la velocidad de 300.000 kilómetros por segundo a que se propagan las ondas hertzianas permite que viajen de un extremo a otro de la Tierra en menos de una décima de segundo), tendría unas claras ventajas civiles y militares sobre el resto de los países.

Guillermo Marconi, que era de origen italiano y que estaba afincado en Gran Breta-

ña, ofreció su descubrimiento a este último país.

Poco a poco fueron mejorando los medios técnicos, y con ello también se obtuvieron mejores resultados.

El resultado más espectacular no se obtuvo hasta el año 1906, en que el americano Lee de Forest inventó el triodo, que se empleó como válvula en un circuito oscilante.

Desde entonces las mejoras que se introdujeron en los circuitos permitieron que la radio se desarrollase rápidamente. Al principio solamente se transmitían mensajes telegráficos, formados por puntos y rayas del alfabeto Morse. Poco a poco se fue perfeccionando el sistema de producción de ondas electromagnéticas y se llegó a la radiofonía, siendo posible realizar una conversación a distancia entre dos interlocutores separados entre sí por muchos miles de kilómetros.

Los perfeccionamientos de la técnica han sido muchos y muy diversos. La radio ha avanzado constantemente hasta el nivel técnico que posee en la actualidad, gracias a los esfuerzos de cientos de técnicos y de científicos cuyos nombres nos son absolutamente desconocidos. La radio es un triunfo colectivo de la humanidad, y sus frutos benefician por igual a toda ella.

Después de la radio vino la televisión, que en esencia no es más que un refinamiento de la radio que permite la transmisión a distancia de imágenes. El desarrollo técnico de la televisión también ha dependido de gran cantidad de personas cuyos nombres no pasarán a la historia.

En la actualidad nuestro espacio está entretelado y repleto de ondas electromagnéticas que se propagan de una a otra parte, transmitiendo mensajes y permitiendo que exista una mejor comunicación entre los hombres.

APENDICE



PROBLEMAS

PROBLEMAS DE APLICACION DE LA LEY DE OHM

Si disponemos de una tensión de 12 V, ¿cuántos amperios circularán conectando una resistencia de 4 Ω ?

Recordemos la expresión de la ley de Ohm:

$$R \cdot I = V$$

Despejando I , tenemos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{4} = 3\text{A}$$

En nuestro caso circulará una corriente de 3 amperios.

¿Qué resistencia habrá que colocar en el circuito, empleando la misma tensión de 12 V, para que la corriente sea de 24 A?

Despejando R , tenemos:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{24} = 0,5\ \Omega$$

Habrà, pues, que poner una resistencia de 0,5 ohmios.

¿Cuál será la diferencia de potencial que habrá que aplicar a una resistencia de 100 Ω para que por ella circule una intensidad de 0,5 A?

$$V = R \cdot I = 100 \cdot 0,5 = 50\text{ V}$$

Aplicando 50 voltios circulará una corriente de 0,5 amperios, o sea, de 500 miliamperios.

¿Qué corriente circulará por una resistencia de 1 k Ω (1.000 ohmios) si se la somete a una diferencia de potencial de 5 V?

Despejando I , tenemos:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5}{1.000} = 0,005\text{ A (5 mA)}$$

¿Qué resistencia habrá que emplear para que por ella circule una corriente de 1 μA (1 μA = microamperio = 10^{-6} A = 0,000001 amperios) bajo una tensión de 28 V?

Despejando R , tenemos:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{28}{0,000001} = 28.000.000\ \Omega$$

es decir, 28 millones de ohmios o, lo que es lo mismo, 28 M Ω (se lee megohm, y megohm = 10^6 ohmios = 1.000.000 de ohmios).

PROBLEMAS DE RESISTIVIDAD

¿En qué unidades se medirá la resistividad?

Ya sabemos que la resistencia se mide en ohmios. Si recordamos la fórmula

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

despejando la resistividad ρ , tenemos:

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

Si tomamos como unidad de longitud l el centímetro, la unidad de sección s será el cm^2 , y entonces la resistividad ρ será:

$$\rho = \frac{R \text{ (en ohmios)} \cdot s \text{ (en cm}^2\text{)}}{l \text{ (en cm)}}$$

Dividiendo por cm,

$$\rho = R \text{ (en ohmios)} \cdot l \text{ (en cm)}$$

luego la resistividad se mide en ohmios por centímetros, es decir, en resistencia por unidad de longitud.

¿Qué resistencia tendrá un trozo de alambre de 1 mm^2 de sección y 10 m de longitud si su resistividad es de $0,5 \Omega$ por cm ?

$$R = 0,5 \frac{1.000 \text{ cm}}{0,01 \text{ cm}^2} = 0,5 \cdot 100.000 = 50.000 \Omega = 50 \text{ k}\Omega \text{ (50 kiloohmios)}$$

Observa que para poder aplicar la fórmula todas las magnitudes deben estar expresadas en las mismas unidades (en este caso en centímetros).

¿Qué longitud tendrá un alambre cuya resistencia es de $24 \text{ k}\Omega$ y cuya sección es de 10 mm^2 , conociendo su resistividad, que es de 1Ω por centímetro?

Despejando l , tenemos:

$$l = \frac{R \cdot s}{\rho} = \frac{24.000 \cdot 0,1}{1} = 2.400 \text{ cm} = 2,4 \text{ metros}$$

PROBLEMAS DE CORRIENTE ALTERNA

¿Qué reactancia presentará un condensador de 1 nF frente a una corriente alterna de frecuencia 50 ciclos/s ?

La fórmula que nos da la reactancia capacitiva es:

$$X_c = \frac{1}{2\pi\nu c} = \frac{1}{6,28 \cdot 50 \cdot 0,000.000.001} = 3,18 \text{ ohmios}$$

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO.

En un circuito alterno existe una resistencia óhmica de 4 ohmios, una reactancia capacitiva de 13 ohmios y una reactancia inductiva de 16 ohmios. ¿Cuál es la impedancia total del circuito?

La fórmula de la impedancia es:

$$Z = \sqrt{R^2 + (Z_L - X_C)^2}$$

Sustituyendo por los valores que conocemos

$$Z = \sqrt{4^2 + (16 - 13)^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5 \Omega$$

La impedancia total será, pues, de 5 ohmios.

En el circuito anterior, ¿qué intensidad circulará si la tensión es de 115 V?

Aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{|Z|} = \frac{115}{5} = 23 \text{ A}$$

Es decir, 23 amperios.

¿Qué intensidad circulará ahora por el circuito si la tensión es de 220 V?

$$I = \frac{220}{5} = 44 \text{ A}$$

PROBLEMAS DE FRECUENCIAS

¿Qué longitud de onda tendrá una onda electromagnética cuya frecuencia es de 300 kc?

Recordemos que $c = \frac{\lambda}{t} = \lambda \nu$

Despejando λ , tenemos:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{300.000.000}{300.000} = 1.000 \text{ m}$$

¿Y la de una onda cuya frecuencia sea de 300 MHz?

$$\lambda = \frac{300.000.000}{300.000.000} = 1 \text{ m}$$

¿Qué frecuencia corresponde a una onda electromagnética cuya longitud es de 2 metros?

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{300.000.000}{2} = 150.000.000 \text{ ciclos/s}$$

Es decir, 150 MHz.

APENDICE

2

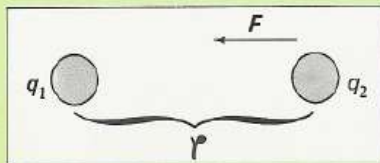
NOTAS

1 Con objeto de adaptar los sistemas de unidades físicas que se emplean en los dos miembros de la ecuación, es costumbre introducir una constante en el segundo miembro.

La ecuación que expresa la ley de Coulomb, queda, pues:

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

Esta sería la fuerza que ejercería q_1 sobre q_2 . Análogamente, q_2 ejercería otra fuerza sobre q_1 que sería igual y de signo contrario que F .



Es muy interesante observar que la ley de Coulomb guarda una absoluta analogía con la ley de la atracción universal de los cuerpos. Dicha ley se expresa así:

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$$

y nos dice que la fuerza de atracción gravitatoria entre dos masas es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

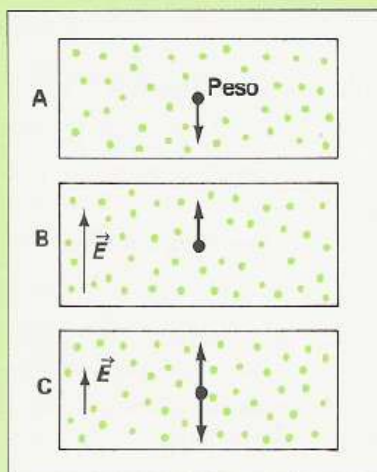
Al igual que antes K , G es una constante de proporcionalidad.

No obstante, hay una notable diferencia, y es que no existen masas negativas y positivas. Las masas del mismo nombre (llámense positivas o negativas) se atraen. No tenemos constancia de que existan masas de otro tipo, por lo que, a diferencia del campo eléctrico, el campo gravitatorio sólo presenta **fuerzas de atracción** y no de **repulsión**. (Ver página 16.)

2 No existe carga eléctrica más pequeña que e^- . Esta es, pues, la unidad o «moneda» en que se deberá medir la carga eléctrica. No obstante su valor es tan pequeño que en la práctica se utilizan otras unidades mucho mayores.

El experimento de Millikan consistía en producir una especie de niebla de aceite, que consiste en una gran cantidad de gotitas esféricas de aceite.

Mediante la aplicación de un campo eléctrico, se cargan eléctricamente las gotitas de aceite. Una vez cargadas, se observa su movimiento en sentido vertical. Dicho movimiento, en ausencia de carga eléctrica, será descendente, A, ya que únicamente actuará su peso. Si aplicamos un campo eléctrico vertical de magnitud suficiente $\vec{E}$, el movimiento de las gotitas de aceite será ascendente, B. Equilibrando cuidadosamente el campo eléctrico aplicado verticalmente, C, se llegará a un estado de equilibrio entre la fuerza debida al campo aplicado y la debida al peso de la gotita.



Como ya hemos dicho, la carga del electrón e^- es tan pequeña que en la práctica no resulta directamente medible.

De la medición de la carga aplicada a gran cantidad de gotitas, Millikan dedujo que, en cada caso, la carga eléctrica de cada gotita de aceite era un múltiplo de dicha carga elemental e^- .

Si se admitiese teóricamente la existencia de cargas eléctricas fraccionarias de e^- , nunca se podrían mantener en equilibrio simultáneamente muchas gotitas de aceite cargadas eléctricamente, lo cual está en contradicción con los hechos experimentales observados. (Ver página 19.)

3 Otra forma de conocer en detalle la naturaleza y el comportamiento de un fenómeno eléctrico es mediante el concepto de **potencial eléctrico**. El potencial eléctrico es una magnitud escalar, y se podría definir como el **nivel** a que se encuentra una carga eléctrica. Es algo parecido al potencial calorífico de un cuerpo, que podemos medir por su temperatura.

Dos cuerpos cualesquiera pueden poseer una determinada cantidad de calorías, igual en ambos, pero uno de ellos puede tenerlas a una temperatura superior a la del otro, por lo cual esas calorías siempre pasarán del más caliente al más frío.

Dos recipientes pueden contener la misma cantidad de agua, pero ésta siempre caerá de arriba hacia abajo, pasando del de mayor nivel (o potencial) al de menor nivel. El agua circulará tanto más de prisa cuanto mayor sea la diferencia de nivel (o diferencia de potencial) entre ambas vasijas.

Análogamente, dos cuerpos cargados podrán estar al mismo potencial eléctrico, o a diferente potencial eléctrico, dependiendo del «nivel» a que se encuentren sus cargas.

El potencial está relacionado íntimamente con el campo. La dirección en que el potencial varía más rápidamente es, precisamente, la que lleva el vector que representa al campo eléctrico. (Ver pág. 22.)

4 Es muy útil reducir, siempre que sea posible, una distribución cualquiera de cargas a otra distribución equivalente de cargas puntuales. Cuando decimos **equivalente** queremos decir que produzca el mismo campo eléctrico, lo cual puede ser válido solamente en una parte del espacio y no en otra.

En el ejemplo de las figuras A y B de la página 23 podemos considerar que ambas distribuciones de carga (y, por lo tanto, ambos campos) son equivalentes fuera de la esfera. En cambio, no podemos concluir que las dos distribuciones de carga sean efectivamente equivalentes en el interior de la línea de puntos.

Si la carga está distribuida homogéneamente en un volumen, es interesante medirla mediante la densidad de carga por unidad de volumen, que se suele representar por ρ .

$$\rho = \frac{Q}{\text{trozo elemental de volumen}}$$



Análogamente, si la carga está distribuida homogéneamente en una superficie, se define la densidad superficial de carga, representada por σ , como:

$$\sigma = \frac{Q}{\text{porción, trozo o pedazo de superficie}}$$

(Ver pág. 23.)

5 Normalmente, al referirnos a magnitudes vectoriales esta suma será una suma vectorial, no una suma algebraica. Dichas sumas coinciden solamente en el caso en que las dos magnitudes vectoriales tengan la misma dirección y el mismo sentido (o sentido contrario), ya que en ese caso, y **sólo en ese caso**, la suma sería la de las longitudes de los vectores (o de sus módulos, para emplear la terminología correcta); y si alguno de los vectores tuviese sentido contrario al de otro, se consideraría su intensidad como un escalar con signo negativo, si es que los otros vectores se considerasen positivos.

En el caso más general, no obstante, los vectores formarán un ángulo entre sí. Entonces la suma vectorial de ambos vectores se define como la diagonal del paralelogramo que determinan los vectores sumandos. (Ver pág. 27.)

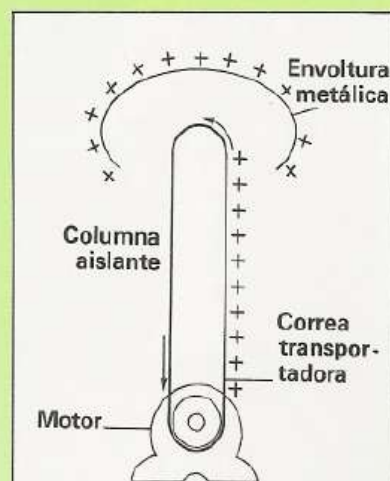


6 La corriente eléctrica o, lo que es lo mismo, el transporte de cargas, no tiene necesariamente que realizarse en el interior de un determinado material. También puede haber un desplazamiento de cargas en el vacío (como ocurre en las válvulas de vacío, tubos de TV, etcétera). Lo importante es que exista la facilidad de que las cargas se puedan separar y mover. Esta condición, que a las temperaturas ordinarias sólo presentan los conductores, a temperaturas muy elevadas pueden presentarla también otras sustancias no conductoras en el llamado «estado de plasma», que es la denominación que reciben los materiales cuando sus cargas atómicas o moleculares de tipo eléctrico se encuentran disociadas o separadas. (Ver pág. 31.)

7 El generador de Van der Graaf es un aparato de laboratorio que permite obtener diferencias de potencial de muchos cientos de miles de voltios (o, lo que es lo mismo, la creación de campos eléctricos muy elevados).

En este aparato se depositan cargas eléctricas sobre una correa de material dieléctrico que se mueve mediante un motor auxiliar (también se podría mover a mano).

La correa transporta las cargas eléctricas desde el sitio donde las recibe (parte inferior del aparato) hasta la parte superior, donde son extraídas y depositadas sobre la envoltura metálica.



Este transporte mecánico de cargas se hace en contra del movimiento que el campo eléctrico producido induciría en dichas cargas.

El campo producido depende directamente del tamaño de la envoltura metálica superior, así como de la altura de la columna aislante. (Ver pág. 40.)

8 Entre otros factores, la temperatura hace cambiar la resistencia de los conductores, por lo que, en rigor, al hablar de la resistencia de un material hay que especificar a qué temperatura se determina ésta.

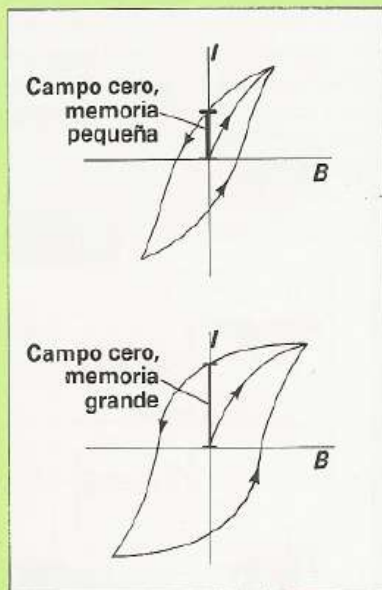
También influyen la presión, el grado de humedad, los esfuerzos mecánicos, los agentes químicos, etcétera.

En el límite, con temperaturas muy elevadas (de más de 5.000 °C), todos los materiales se pueden hacer conductores. Este estado se llama de **plasma** y en él los átomos constituyentes del material se encuentran disgregados y sus electrones gozan de movilidad absoluta. Se trata, pues, de una especie de «sopa electrónica» donde es posible establecer corrientes eléctricas con gran facilidad. Lo que no resulta tan fácil es manejar el material a unas temperaturas tan elevadas. El hongo de una explosión atómica está constituido por gas en estado de plasma. (Ver pág. 46.)



9 El término «dulce» no hace ninguna referencia al sabor (que, por cierto, es bastante soso) del hierro. Se llama hierro dulce al metal que posee un determinado grado de pureza. El hierro dulce es muy permeable a las líneas de fuerza del campo magnético, pero posee muy escasa «memoria» del mismo. Por otra parte, sus cualidades mecánicas son muy escasas, ya que se rompe con facilidad y se desgasta muy rápidamente.

Por eso se emplea mucho el acero, que es hierro con una determinada cantidad, muy pequeña, de otras sustancias (principalmente carbono), que cambia radicalmente sus propiedades, tanto mecánicas como magnéticas. El acero es mucho más elástico, resistente y fuerte que el hierro dulce, y sus propiedades magnéticas también varían. En particular, su «memoria» magnética, que le permite conservar el campo magnético una vez que se lo aplica exteriormente. Gráficamente se representa en el llamado «ciclo de histéresis».

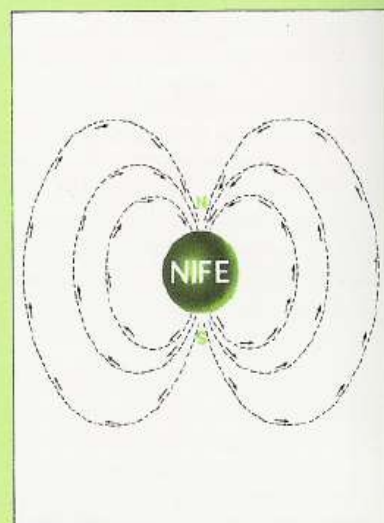


Es digno de tener en cuenta que la diferencia de composición química entre el hierro y el acero es muy pequeña. Es de sólo un uno o un dos por ciento, mucho menor que la que presentan sus propiedades externas respectivas. (Ver página 51.)

10 Los polos magnéticos sueltos o monopolos no han podido ser encontrados. Sin embargo, uno de los autores de la Mecánica Cuántica (que, a pesar de llamarse así, es más una Matemática que una Mecánica), llamado Dirac, demostró teóricamente que debería existir el monopolo magnético.

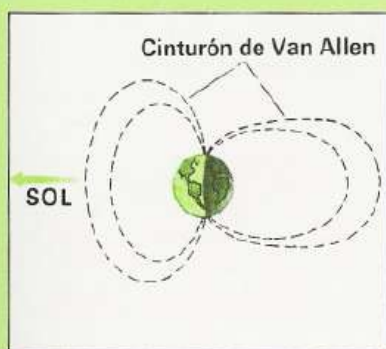
Todas las consecuencias que se deducen de la Mecánica Cuántica han demostrado ser ciertas y cumplirse. De acuerdo con ello, el monopolo debería existir también, según Dirac. Se han hecho experimentos de muchas clases con objeto de encontrar algún monopolo, pero hasta la fecha sin resultado positivo alguno. Lo que no podemos es asegurar de manera concluyente que **no existen**. Lo más probable es que alguna otra causa determine que en nuestro mundo no sea fácil encontrar monopolos sueltos, porque en su estado natural se encuentran asociados formando imanes elementales. Quizá algún día mejoren nuestros métodos experimentales y podamos encontrar algún monopolo, con lo cual se demostrará que Dirac tenía razón. (Ver pág. 54.)

11 La elección del nombre de polo Norte del imán es totalmente errónea y contradictoria con la propiedad básica de los imanes, según la cual los polos del mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen.



De acuerdo con esta regla, el extremo del imán que señala al Norte debería llamarse polo Sur del imán. O, de lo contrario, si aceptamos como buena la denominación de polo Norte del imán, resulta que el polo Sur magnético de la Tierra coincide con su polo Norte geográfico. No obstante, el empleo de la denominación de polo Norte del imán al que señala al Norte es tan universal que sería casi imposible desterrarlo. (Ver pág. 55.)

12 Los planetas que poseen atmósfera, como es el caso del nuestro, presentan fenómenos cuya explicación sólo es posible considerando las interacciones entre cargas eléctricas y campos magnéticos. Tal es el caso de los iones gaseosos, que ocupan la parte superior de la atmósfera terrestre. Dichos iones producen pequeñas corrientes que quedan capturadas por el campo magnético de la Tierra dando lugar al Cinturón de Van Allen, cuya existencia real solamente se ha podido demostrar con ayuda de satélites artificiales, a pesar de que su existencia, desde el punto de vista teórico, podía haber sido prevista desde hace mucho tiempo. (Ver página 75.)



13 Los aceleradores de partículas son dispositivos experimentales muy complicados en los que se producen campos eléctricos y magnéticos de gran intensidad. En estos dispositivos existe una fuente de partículas atómicas que lanza a éstas contra un espacio donde se ven sometidas a la acción de los mencionados campos.



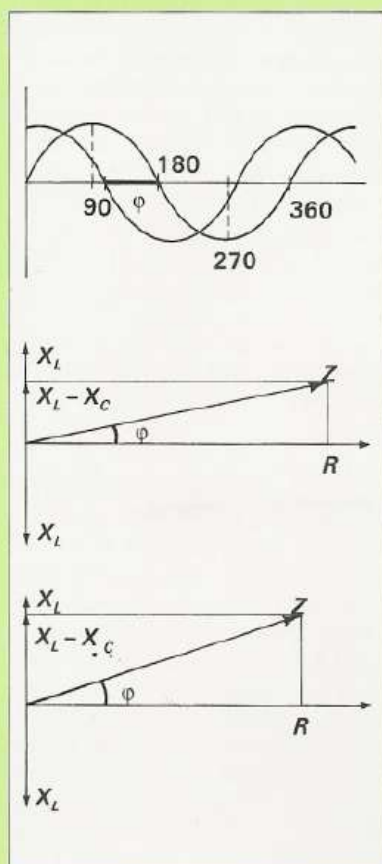
La finalidad de estas grandes máquinas (algunas realmente grandes y complicadas, con un diámetro de hasta 300 m) es intentar descubrir la naturaleza íntima de las partículas elementales que componen la materia. Desgraciadamente, al ir incrementándose la potencia de estos aceleradores de partículas, se va descubriendo que las partículas elementales no son tan sencillas como se creía, y que a su vez están formadas por otras partículas aún más elementales y en cantidades crecientes. (Ver pág. 75.)

14 Es muy importante que la frecuencia de la corriente alterna sea lo más exacta posible, ya que los motores eléctricos alternos cambiarían su velocidad si hubiese alguna variación en la frecuencia de la red eléctrica, con las consecuencias tan variadas e imprevisibles que ello acarrearía.

Los mecanismos de control de la velocidad de giro de los alternadores (y, por consiguiente, de la frecuencia de la corriente producida en ellos) son tan precisos que en la práctica no varían en más de unos pocos ciclos en 24 horas de tiempo de servicio. Es tan grande su precisión que se puede utilizar la frecuencia de la red eléctrica como señal patrón para medir el tiempo con gran exactitud. Existen muchos relojes eléctricos que funcionan precisamente así. (Ver página 89.)

15 Como ya sabemos, un ciclo completo de una onda sinusoidal equivale a una vuelta completa de un vector alrededor de la circunferencia trigonométrica. Un desfase entre dos ondas sinusoidales es una descolocación relativa de una y otra. Ello equivale a que los vectores ocupen posiciones distintas en la circunferencia. Por eso se miden los desfases en grados.

En la práctica hay que tener en cuenta este desfase —conocido popularmente como ϕ (fi)—, sobre todo en instalaciones donde existen grandes inductancias (por ejemplo, fábricas e industrias donde funcionan muchos motores eléctricos), ya que se pierde una gran cantidad de energía (llamada potencia reactiva) inútilmente. Para evitarlo se procede a «corregir el factor de potencia» añadiendo condensadores hasta que se neutralice (o se reduzca al mínimo) la potencia reactiva. Se llama **factor de potencia** al coseno del ángulo de desfase ϕ . (Ver pág. 94.)



APENDICE

3

BIOGRAFÍAS

Ampère, André-Marie. (Francés; 1775-1836.) Fue profesor de Física y Química en París. Al enterarse del descubrimiento de Oersted en 1820 consiguió demostrar que las corrientes eléctricas determinan la aparición de fuerzas entre los conductores que las transportan.

Dedujo la expresión matemática que relaciona las fuerzas que aparecen entre dos conductores paralelos recorridos por una corriente con la magnitud y dirección de las corrientes.

La unidad de intensidad eléctrica lleva, en honor suyo, su nombre: **amperio**.

Cavendish, Henry. (Inglés; 1731-1810.) Persona de gran timidez, rehúsa el trato con la gente y no llegó a acabar ninguna carrera. No obstante, al tener un carácter introvertido, desarrolló una magnífica labor investigadora que se vio facilitada por el hecho de disponer de abundantes recursos económicos. Realizó abundantes experimentos de Química, pero su contribución más importante a la Física fue el desarrollo experimental de la balanza de torsión, con la cual se determinó la validez de la ley de la atracción universal de Newton, así como la ley de la atracción electrostática de Coulomb.

Coulomb, Charles-Augustin. (Francés; 1736-1806.) Ingeniero militar de profesión, pero científico e investigador de afición, experimentó gran curiosidad por los fenómenos eléctricos y dedujo experimentalmente la ley matemática que lleva su nombre y que relaciona la fuerza atractiva o repulsiva entre dos cuerpos cargados con la magnitud de la carga eléctrica que contienen.

En honor a su labor, la unidad de carga eléctrica recibe el nombre de **culombio**.

Curie, Pierre (1859-1906). Químico francés. Estudió en la Sorbona, donde ejerció como profesor ayudante en el laboratorio de Física.

Sus primeros trabajos se dirigieron al estudio de la piezo-electricidad en un cristal de cuarzo. Su tesis doctoral versó sobre el efecto del calor en el magnetismo, demostrando que, pasada una cierta temperatura (llamada punto de Curie), las propiedades magnéticas de una sustancia desaparecen para volver a aparecer de nuevo cuando, por enfriamiento, se llega a una temperatura inferior a dicho punto.

Posteriormente, junto con su esposa María Skłodowska, cambió la línea de su trabajo dirigiéndolo al estudio de la radiactividad, campo en el que es más conocido universalmente que en el del magnetismo.

Edison, Thomas. (Americano; 1847-1931.) Inventor autodidacta, hijo de un inmigrante, desarrolló gran cantidad de inventos desde la más temprana edad, entre ellos el fonógrafo, la bombilla eléctrica y el teléfono (que había sido descubierto y ensayado antes por Graham Bell, pero que Edison perfeccionó). Precisamente cuando estaba ensayando con sus primeras bombillas observó que circulaba una corriente eléctrica entre un electrodo introducido en la ampolla de vidrio y el filamento incandescente siempre que el electrodo estuviese a un potencial positivo respecto al filamento. Este fenómeno, origen de los diodos y de todas las demás válvulas termoiónicas, se conoce como **efecto Edison**.

Faraday, Michael. (Inglés; 1791-1867.) Físico y químico de origen humilde que, gracias a que trabajaba de encuadernador, pudo tener acceso a muchos libros y aprender los fundamentos de la ciencia.



Realizó experiencias sobre electrólisis y descubrió las leyes que gobiernan este fenómeno. El equivalente electroquímico se denomina **faraday** en honor a este científico. Realizó el descubrimiento del fenómeno de la inducción electromagnética y experimentó con circuitos formados por bobinas. La unidad de capacidad eléctrica se denomina **faradio** en homenaje a su labor.

Forest, Lee de. (Americano; 1873-1961.) Doctor en Física e inventor. Enterado del descubrimiento del efecto Edison, introdujo otro electrodo en el diodo, llamado rejilla, y fabricó el primer triodo. Con ello nacieron las lámparas o tubos termoiónicos y se pudo desarrollar la radio. Por eso se conoce a Lee de Forest como el padre de la radio.

Franklin, Benjamín. (Americano; 1706-1790.) Político y diplomático de profesión, y gran aficionado a la investigación científica, alcanzó tanta fama en su faceta de hombre político como la que logró como científico. Estaba muy interesado en los fenómenos eléctricos y tuvo la intuición de que el rayo no era otra cosa que un fenómeno eléctrico de grandes proporciones. Experimentó



con una cometa provista de una varilla metálica que elevaba durante las tormentas. Recogiendo los rayos con la cometa conseguía cargar botellas de Leyden, demostrando así que, efectivamente, el rayo es un fenómeno de naturaleza eléctrica.

Galvani, Luigi. (Italiano; 1737-1798). Fue profesor de Anatomía en la Universidad de Bolonia y descubrió que las patas o ancas de una rana que estaba diseccionando se movían repentinamente al tocar los músculos con un objeto metálico si se ponía en marcha una máquina eléctrica que se encontraba próxima. Galvani creyó que el origen de las contracciones musculares residía en la «electricidad animal», como él la denominaba.

Se demostró que su teoría era errónea, pero, no obstante, los fenómenos eléctricos recibían el nombre de **galvanismo**, y aun en la actualidad los fenómenos electrolíticos industriales, relativos a los metales, se conocen genéricamente como tratamientos **galvánicos**.

Gauss, Johann Karl Friedrich. (Alemán; 1777-1855.) Matemático excelente que desde muy temprana edad demostró sus cualidades en la escuela y continuó haciéndolo más tarde en la Universidad de Gotinga.

Sus trabajos más importantes fueron de carácter matemático y astronómico (fue el primero en determinar la órbita del asteroide Ceres). También investigó acerca del

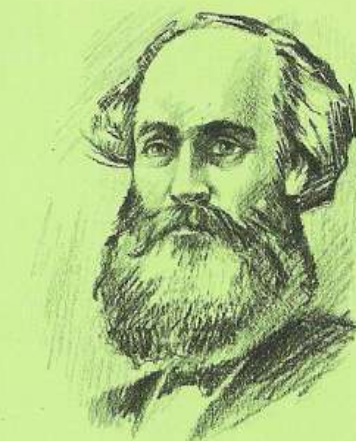
magnetismo terrestre, por lo cual la unidad de intensidad de campo magnético lleva su nombre. Algunas de las consecuencias de sus descubrimientos matemáticos afectan a la Electricidad, tal como el teorema de Gauss, que es la aplicación directa de un concepto matemático a los fenómenos eléctricos.

Hertz, Heinrich-Rudolf. (Alemán; 1857-1894.) Físico, inició estudios de Ingeniería, pero más tarde los cambió por los de Física. Estudió los fenómenos eléctricos y en particular estaba muy interesado en la teoría electromagnética de Maxwell.

Descubrió la validez de dicha teoría y demostró la existencia de las ondas electromagnéticas, también llamadas **hertzianas**. Realizó muchos experimentos con objeto de asegurarse de que las ondas descubiertas por él eran las mismas que las predichas en la teoría de Maxwell.

Joule, James Prescott. (Inglés; 1818-1889.) Físico, de posición adinerada, que empleó sus recursos económicos en la investigación. Estaba muy interesado en la medición de distintas magnitudes, especialmente de las caloríficas. Encontró la equivalencia entre trabajo mecánico y calor, así como la relación entre corriente eléctrica y calor desprendido por un conductor o por una resistencia. La unidad de trabajo se denominó **julio**, o **joule**, en homenaje a su trabajo.

Marconi, Guglielmo. (Italiano; 1874-1937.) Ingeniero especialista en Electricidad, procedente de una familia acomodada; pensó en aplicar las ondas electromagnéticas descubiertas por Hertz como vehículo de un sistema de transmisión de información a distancia. Apoyándose en el dispositivo experimental de Hertz y empleando la antena que previamente había introducido Popov, consiguió establecer comunicaciones a distancias cada vez mayores. En 1901 consiguió comunicar desde Gran Bretaña hasta Terranova. Recibió un premio Nobel y el Gobierno italiano le nombró marqués.

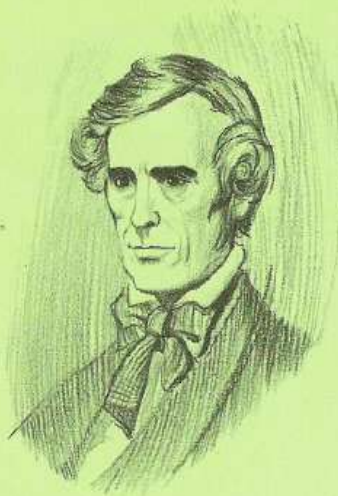


Maxwell, James Clerk. (Inglés; 1831-1879.) Matemático y físico, estaba muy interesado en los fenómenos luminosos y astronómicos. A él se debe la explicación sobre la naturaleza de los anillos de Saturno. También realizó estudios sobre Estadística y Termodinámica. Su contribución más importante a la Física, no obstante, es su teoría electromagnética, que constituye uno de los trabajos matemáticos más importantes que el hombre ha producido. En esta teoría se demostraba la existencia de ondas electromagnéticas y se sugería la posibilidad de que la luz fuese, a su vez, una onda electromagnética de muy corta longitud de onda.

Millikan, Robert Andrews (1868-1953). Físico norteamericano, trabajó en varias Universidades de Alemania y Estados Unidos.

Es universalmente conocido en el mundo de la Física por ser quien primero pudo determinar la carga y la masa de un electrón de una forma experimental. Estos trabajos le valieron el premio Nobel de Física en 1923.

Posteriormente se dedicó al estudio de los rayos cósmicos, recién detectados por Hertz. Sus ideas en este campo no resultaron afortunadas por mantener desde un principio la suposición errónea de que los rayos cósmicos son un tipo de radiación electromagnética pura de muy alta energía, a pesar de que ya en su época se predijo la naturaleza corpuscular de estos rayos.



Morse, Samuel. (Americano; 1791-1872.) Artista y político de ideas racistas, consiguió que el Senado le autorizase a construir el primer telégrafo eléctrico, que consiguió enlazar dos localidades separadas entre sí unas 40 millas (70 km). Sus conocimientos sobre Electricidad eran muy escasos, y su telégrafo se convirtió en realidad gracias a la ayuda de Henry (que Morse nunca quiso reconocer). Para la transmisión de mensajes telegráficos, Morse ideó un alfabeto formado por puntos y rayas (señales cortas y largas) que aún se utiliza en la actualidad.

Oersted, Hans Christian. (Danés; 1777-1851.) Trabajó como boticario y prefirió los estudios de Física a los de Química. Llegó a ser catedrático de la Universidad de Copenhague. Investigó sobre los fenómenos de la corriente eléctrica, que estaban de moda en toda Europa. Durante una explicación en clase descubrió, casi por accidente, que una corriente eléctrica en las proximidades de una brújula determinaba una desviación de la aguja imantada de dicha brújula, lo cual sólo podía explicarse admitiendo que se había creado un nuevo campo magnético, que sólo podía provenir de la corriente eléctrica. Así quedó demostrado que la Electricidad y el Magnetismo estaban estrechamente relacionados, y con ello se englobaban ambas especialidades de la Física en una disciplina común.

Ohm, Georg Simon. (Alemán; 1789-1854.) Físico, hijo de un maestro mecánico, investigó sobre el tema de moda en aquella época, que era, precisamente, el de la Electricidad. A Ohm debemos el descubrimiento de la ley que lleva su nombre y que relaciona la intensidad con la fuerza electromotriz y con la resistencia de un circuito. También le debemos la expresión que relaciona la resistencia de un conductor con sus dimensiones externas (longitud y grosor). Como tributo a su labor en este terreno de la ciencia, la unidad de resistencia se llama **ohmio**.

Popov, Aleksandr Stepanovich. (Ruso; 1859-1905.) Físico, hijo de un sacerdote, cambió la vocación de su padre por la de matemático y físico.

Enterado del descubrimiento de las ondas electromagnéticas por Hertz, se adelantó a Marconi en un año en la utilización de una antena para aumentar el alcance de las ondas hertzianas, pero más tarde se desinteresó del tema de las comunicaciones por radio y se dedicó a captar las señales producidas por las tormentas. Ello permitió que Marconi se concentrara en el problema de resolver la comunicación a grandes distancias, por lo que fue él y no Popov el que cosechó la fama de sus investigaciones sobre este campo.

Rowland, Henry Augustus. (Americano; 1848-1901.) Físico que estudió en Alemania y cuyos trabajos fueron más famosos en Europa que en América. Realizó importantes trabajos en Óptica, produciendo redes de difracción de gran calidad gracias a las cuales se pudo avanzar excepcionalmente en la Espectroscopia y en la Astronomía.

La contribución más importante de Rowland a la Electricidad fue su famoso experimento mediante el cual se demostró que el transporte de cargas eléctricas era capaz de producir efectos magnéticos, lo mismo que una corriente que circulase por un conductor.

Van de Graaf, Robert. (1901-1967). Físico norteamericano, estudió en la Sorbona y en Oxford y formó parte después del Institute of Technology de Massachusetts.

Se dedicó al estudio de la Electricidad, siendo conocido por el generador electrostático que lleva su nombre, que produce con gran rapidez unos potenciales elevadísimos. En principio este generador se utilizó para acelerar partículas atómicas, pero muy pronto fue totalmente desbancado por el ciclotrón de Lawrence, quedando el generador de Van de Graaf casi como una curiosidad espectacular de laboratorio.

Volta, Alessandro. (Italiano; 1745-1827.) Físico que comenzó como estudiante un poco retrasado, pero que muy pronto alcanzó a sus colegas. Experimentó sobre los fenómenos eléctricos, muy de moda en su época. Discutió con Galvani sobre el origen de la corriente eléctrica que hacía que se produjesen convulsiones en los músculos de la rana. Volta opinaba (y con razón) que el fenómeno de aparición de una corriente eléctrica se debía únicamente a los metales que intervenían en el proceso y no a la presencia de ningún componente animal. Fabricó la primera batería y alcanzó gran fama por ello. La unidad de diferencia de potencial se llama **voltio**, en honor suyo.



APENDICE



DICCIONARIO DE TERMINOS

Alternador. Generador electromagnético que da lugar a una fuerza electromotriz capaz de producir una corriente alterna.

Anodo. Electrodo que por convenio posee una carga eléctrica positiva.

Capacidad eléctrica. Característica de los condensadores que proporciona la relación entre la carga adquirida por las placas de aquéllos y la diferencia de potencial que existe entre éstas.

Cátodo. Electrodo que por convenio posee una carga eléctrica negativa.

Continuo. Se dice del material caracterizado por una composición constante de todas sus partes; es decir, cada trozo de materia tiene las mismas propiedades que otro trozo de la misma materia.

Cristal. Los cuerpos sólidos tienen sus átomos ordenados según una cierta disposición geométrica. Esta ordenación de átomos se llama estado cristalino, y un trozo de este material se denomina cristal.

Cuantificación. Propiedad que poseen algunas magnitudes físicas de existir solamente en múltiplos de una cantidad elemental llamada cuanto.

Diamagnetismo. Propiedad de algunas sustancias de ser alejadas hacia los puntos de menor intensidad de un campo magnético.

Dieléctrico. Sustancia no conductora de la electricidad cuyas moléculas sufren una cierta polarización al ser sometidas a la acción de un campo eléctrico.

Dinamo. Sistema destinado a producir una corriente continua utilizando métodos electromagnéticos.

Discreto. Propio del material que se encuentra agrupado en granos o paquetes perfectamente distinguibles y separables. El concepto de distribución discreta es opuesto al de distribución continua.

Electrodo. Trozo de material conductor, casi siempre metálico, que interviene en un proceso eléctrico. Si tiene carga positiva se llama ánodo; si es negativa, cátodo.

Electrólisis. Proceso eléctrico donde intervienen dos electrodos y unas sustancias disueltas en un líquido (llamado electrolito) que proporcionan iones portadores de carga.

Electrostática. Rama de la Electricidad que estudia los fenómenos asociados a las cargas eléctricas en reposo. El estudio de las cargas en movimiento se llama Electrodinámica.

Energía. Desde el punto de vista de la Física, energía es la capacidad de efectuar un trabajo (es decir, un movimiento, una deformación o un cambio de estado).

Ferromagnetismo. Propiedad de algunas sustancias de ser atraídas fuertemente hacia los puntos en que la intensidad es máxima en un campo magnético.

Flujo. Característica de cada punto de un campo vectorial que expresa el número de líneas de fuerza de dicho campo que atraviesa una superficie unidad colocada perpendicularmente al campo en el punto considerado.

Higroscópico. Un cuerpo higroscópico es aquel que presenta tendencia a absorber el agua del ambiente.

Histéresis. Característica de las sustancias ferromagnéticas por la cual «recuerdan» sus anteriores estados magnéticos.

Imanación. Reorientación u ordenamiento de las órbitas de los electrones en el interior de la materia al ser introducida en un campo magnético.

Inducción electromagnética. Fenómeno por el cual se produce una corriente eléctrica mediante la variación del flujo magnético que atraviesa un circuito.

Ion. Una parte de una molécula que después de ser dividida posee una carga eléctrica intrínseca y que se encuentra libre para moverse y poder transportar una carga de un sitio a otro.

Macroscópico. Se utiliza este adjetivo cuando se quiere describir el comportamiento o las propiedades de un cuerpo observándolo desde fuera, sin profundizar en su naturaleza íntima.

Magnetita. Mineral de hierro, de estructura cristalina y color oscuro, que consta de hierro y oxígeno y que en estado natural presenta magnetismo.

Masa. Cantidad de materia (es decir, cantidad de moléculas y de átomos) que posee un cuerpo.

Microscópico. Este adjetivo se aplica a aquellas ocasiones en que se descubre el comportamiento o las propiedades de un cuerpo estudiando lo que ocurre en su interior.

Moléculas polares. Son aquellas moléculas caracterizadas por presentar espontáneamente una separación entre sus cargas eléctricas, por lo cual se comportan como un dipolo, es decir, un cuerpo alargado con carga eléctrica positiva en un extremo y negativa en el otro extremo.

Oscilación amortiguada. Una señal producida en un circuito, que se caracteriza porque su amplitud decrece rápidamente al transcurrir un cierto tiempo. Si la amplitud se mantiene constante, se llama oscilación mantenida o entretenida.



Paramagnetismo. Propiedad de algunas sustancias de ser atraídas hacia los puntos de mayor intensidad en un campo magnético.

Polarización. Proceso que presentan algunos materiales cuando se les somete a la acción de un campo eléctrico externo y que se caracteriza porque las moléculas de los materiales se orientan paralelamente al campo aplicado.

Puntual. Se dice que una magnitud es puntual cuando todas sus dimensiones físicas son despreciables en comparación con las del resto del sistema. En ese caso se puede considerar que esa magnitud está concentrada en un punto sin dimensiones.

Rayos catódicos. Emisión electrónica proveniente del cátodo que se produce en un tubo de vacío cuando en su interior existen dos electrodos entre los cuales se establece una gran diferencia de potencial.

Selectividad. Propiedad que tiene un circuito oscilante de rechazar las corrientes de frecuencias

distintas de la suya propia de resonancia. Cuanto más selectivo es un circuito, menos frecuencias pasan a través de él, excepto la frecuencia de resonancia.

Sistema. Nombre con el que se designa, en Física, a un conjunto de cuerpos que intervienen en un fenómeno determinado. Si ese conjunto de cuerpos puede intercambiar materia o energía con otros cuerpos exteriores al sistema se llama **sistema abierto**. Si no puede intercambiar nada con los cuerpos exteriores se llama **sistema cerrado**. En el caso de la Electricidad, el sistema formado por cuerpos que no pueden intercambiar carga eléctrica con el exterior se denomina **sistema aislado**.

Solenoides. Conjunto de espiras arrolladas de manera uniforme a un eje recto.

Termoiónico. Proceso de liberación de iones mediante la temperatura. Es el mecanismo por el que se crean cargas eléctricas libres alrededor de un filamento metálico incandescente en el interior de las válvulas electrónicas.

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Su naturaleza y aplicaciones

