

Unidad

1 **Electricidad y magnetismo** **8**

TEMA 1 | FUERZA ELÉCTRICA Y MAGNETISMO

1. Carga eléctrica	10
2. Fuerza eléctrica	13
3. Campo eléctrico	15
4. Energía potencial eléctrica	17
5. Condensadores	20
6. Movimiento de cargas en un campo eléctrico	22
7. Fenómenos magnéticos	24
Resumen	31
Glosario	32
Física aplicada	33
Comprueba lo que sabes	34
Ampliación de contenidos	36
Ejercicios	38
La Física en la historia	39

TEMA 2 | ELECTROMAGNETISMO Y CIRCUITOS ELÉCTRICOS

1. Inducción electromagnética	41
2. Corriente continua y alterna	49
Resumen	59
Glosario	60
Física aplicada	61
Comprueba lo que sabes	62
Ampliación de contenidos	64
Ejercicios	66
La Física en la historia	67

TEMA 3 | ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

1. Electromagnetismo	69
2. Emisión y propagación de ondas electromagnéticas	71
3. Características de las ondas electromagnéticas	73
4. Espectro electromagnético	75
5. Transporte de energía en las ondas electromagnéticas	78
6. Propiedades de las ondas electromagnéticas	79
7. Modelo de transmisión de las ondas electromagnéticas	81
Resumen	85
Glosario	86
Física aplicada	87
Comprueba lo que sabes	88
Ampliación de contenidos	90
Ejercicios	92
La Física en la historia	93

PREPARANDO LA PRUEBA	94
EJERCITACIÓN Y REFUERZO	96

2 Física moderna y estructura atómica

98

TEMA 1 | FÍSICA MODERNA

El siglo de la Física moderna	101
1. Teoría de la relatividad	102
2. La mecánica cuántica	108
3. Efecto fotoeléctrico	110
4. Ondas de materia de Louis de Broglie	113
5. Determinismo científico e incerteza	114
Resumen	117
Glosario	118
Física aplicada	119
Comprueba lo que sabes	120
Ampliación de contenidos	122
Ejercicios	124
La Física en la historia	125

TEMA 2 | ESTRUCTURA ATÓMICA

1. Génesis de la idea de átomo	127
2. Los primeros modelos	128
3. Modelo atómico de Bohr	132
4. Modelo mecano-cuántico	136
Resumen	141
Glosario	142
Física aplicada	143
Comprueba lo que sabes	144
Ampliación de contenidos	146
Ejercicios	148
La Física en la historia	149

TEMA 3 | NÚCLEO ATÓMICO

1. El núcleo atómico	151
2. La radiactividad	154
3. Reacciones nucleares	167
4. Aplicaciones de la radiactividad	173
Resumen	175
Glosario	176
Física aplicada	177
Comprueba lo que sabes	178
Ampliación de contenidos	180
Ejercicios	182
La Física en la historia	183
PREPARANDO LA PRUEBA	186
EJERCITACIÓN Y REFUERZO	188

Solucionario	190
---------------------	------------

Anexo	194
--------------	------------

Bibliografía	197
---------------------	------------

Agradecimientos	199
------------------------	------------

Uno de los fenómenos naturales más abundantes en la tierra son las tormentas eléctricas. La descarga eléctrica o chispa eléctrica que llega a tierra recibe el nombre de rayo y la chispa que va de una nube a otra, se llama relámpago, aunque normalmente los dos son usados como sinónimos del mismo fenómeno. La aparición del rayo es solo momentánea, seguida a los pocos momentos por un trueno causado por la expansión brusca del aire que rodea al rayo debido al aumento de la temperatura.

Los fenómenos eléctricos son estudiados por la electrostática, rama de la Física, que estudia las cargas eléctricas en reposo, las fuerzas que se ejercen entre ellas y su comportamiento al interior de los materiales. Es importante considerar que la electricidad y el magnetismo están estrechamente relacionados y que a partir de 1820, con la experiencia de **Hans Christian Oersted**, con corrientes eléctricas, se inicia el electromagnetismo, rama de la Física que estudia la relación entre ambos fenómenos. Sin embargo, en este tema estudiaremos inicialmente los fenómenos eléctricos a modo de introducción al electromagnetismo.

Al estudiar este tema, conocerás acerca de las cargas eléctricas, las fuerzas que intervienen en la interacción entre ellas a través del campo eléctrico, cómo se relacionan con la materia, cómo se comportan en presencia de un campo magnético y cómo podemos cuantificar y describir los fenómenos asociados.

Los contenidos de este tema, están organizados de la siguiente forma:



Carga eléctrica

Fuerza eléctrica

Potencial eléctrico

Condensadores

Movimiento de carga en un campo eléctrico

Fenómenos magnéticos

1. La carga eléctrica

Una de las interacciones fundamentales descritas por la Física es la electricidad. La carga eléctrica, al igual que la masa, es una propiedad característica de la materia y es la causa de los fenómenos asociados a la electricidad.

Probablemente fueron los antiguos filósofos griegos, –particularmente Tales de Mileto (624 – 543 a. C.)– los primeros en observar fenómenos eléctricos. Unos 500 años antes de Cristo, comprobaron que cuando frotaban con piel de animal un trozo de **ámbar** (un tipo de resina fósil), esta era capaz de atraer algunos objetos muy livianos como semillas secas.

Los fenómenos electrostáticos, como escuchar chasquidos al sacarnos una prenda de vestir, peinar varias veces nuestro cabello seco y luego acercarlo a pequeños trozos de papel, por ejemplo, se producen por la interacción de la carga eléctrica de un cuerpo con la de otro. La palabra **electricidad** proviene del término **élektron**, palabra con que los griegos llamaban al ámbar.

Cuando un átomo –o un cuerpo– tiene la misma cantidad de cargas positivas (protones) y negativas (electrones) se dice que está eléctricamente **neutro**. Si se produce un desequilibrio entre la cantidad de electrones y protones, se dice que está **electrizado**. El cuerpo que pierde electrones queda con carga positiva y el que recibe electrones queda con carga negativa. Se llama **carga eléctrica (q)** al exceso o déficit de electrones que posee un cuerpo respecto al estado neutro. La carga neta corresponde a la suma algebraica de todas las cargas que posee un cuerpo.

La carga eléctrica permite cuantificar el estado de electrización de los cuerpos siendo su unidad mínima la carga del electrón. Esto significa que la carga eléctrica q de un cuerpo está **cuantizada** y se puede expresar como nq , en que n es un número entero (incluyendo el cero); sin embargo, como la carga del electrón es muy pequeña, se utiliza un múltiplo de ella: el **coulomb (C)**, que es la carga obtenida al reunir $6,24 \times 10^{18}$

electrones. También se usan con mayor frecuencia los submúltiplos del coulomb: el microcoulomb (μC) que equivale a 10^{-6} C o el picocoulomb (pC) que corresponde a 10^{-12} C (otros submúltiplos: el $\text{mC} = 10^{-3}$ C o el $\text{nC} = 10^{-9}$ C). Por medio de un **electroscopio** (instrumento detector de carga) se puede comprobar que un cuerpo está electrizado y que los cuerpos electrizados con el mismo signo se repelen y los cuerpos electrizados con signo distinto se atraen.



B. Franklin (1706-1790) además de ser un científico, inventor (a él se debe el pararrayos) y un político que influyó en la independencia de EEUU, fue uno de los primeros en experimentar con las tormentas eléctricas. El llamó positiva a la electricidad que posee el vidrio frotado y negativa a la del ámbar.

ACTIVIDAD 1: CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROSCOPIO

Necesitas un frasco de vidrio, un trozo de plumavit, 20 cm de alambre de cobre de 1 mm y papel aluminio.

1. Con el trozo de plumavit, haz una tapa que quede ajustada en la boca del frasco de vidrio y practícale un orificio en el centro de modo que al introducir el alambre por él, este quede apretado y fijo.
2. Dobla el alambre de cobre en forma de L y ubica un trozo de papel aluminio (6 cm) en forma de v invertida en el extremo doblado del alambre. Introduce el alambre por el orificio y tapa el frasco.

En el extremo libre fija una "pelotita" de papel aluminio.

3. Averigua qué otras formas hay de construir un electroscopio.



1.1 Formas para electrizar un cuerpo

Al observar lo que sucede cuando frotamos con nuestra ropa una regla plástica y la acercamos a las hojas de un cuaderno o al "hilo" de agua que cae por una llave de agua, o cuando notamos una chispa al tocar a una persona luego de caminar por una alfombra en un día de verano, entre otros ejemplos, podemos inferir que la materia se puede electrizar.

Un cuerpo eléctricamente neutro se electriza cuando gana o pierde electrones.

Existen tres formas básicas de modificar la carga neta de un

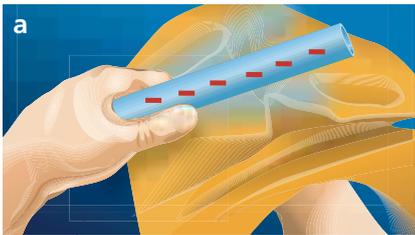
cuerpo: electrización por **frotamiento, contacto e inducción**. En todos estos mecanismos siempre está presente el principio de conservación de la carga, que nos dice que la **carga eléctrica no se crea ni se destruye, solamente se transfiere de un cuerpo a otro**.

a. Frotamiento. En la electrización por fricción, el cuerpo menos conductor saca electrones de las capas exteriores de los átomos del otro cuerpo quedando cargado negativamente y el que pierde electrones queda cargado positivamente.

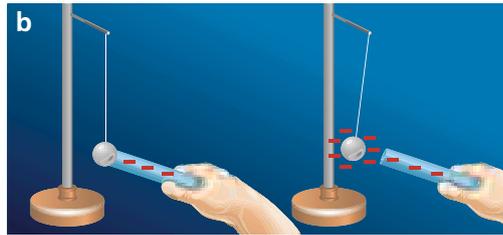
b. Contacto. En la electrización por contacto, el que tiene

exceso de electrones (carga $-$) traspassa carga negativa al otro, o el que tiene carencia de ellos (carga $+$) atrae electrones del otro cuerpo. Ambos quedan con igual tipo de carga.

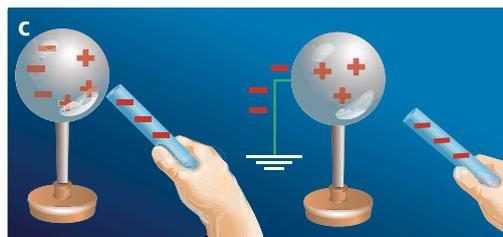
c. Inducción. Al acercar un cuerpo cargado al conductor neutro, las cargas eléctricas se mueven de tal manera que las de signo igual a las del cuerpo cargado se alejan en el conductor y las de signo contrario se aproximan al cuerpo cargado, quedando el conductor polarizado. Si se hace contacto con tierra en uno de los extremos polarizados, el cuerpo adquiere carga del signo opuesto.



Cuando se frota una barra de plástico con lana o con un paño de seda, por ejemplo, se observa que la barra es capaz de atraer pequeños trozos de papel. Por convención, (debida a B. Franklin), la barra queda negativa. Si la barra es de vidrio, queda cargada positivamente.



Al tocar con una barra de plástico electrizada una bolita (de plumavit, por ejemplo) en un péndulo electrostático, se ve que esta es repelida por la barra debido a que la bolita se carga negativamente, ya que de la barra pasaron electrones causando una fuerza de repulsión.



Al acercar la barra cargada al conductor neutro, este se polariza, debido a las fuerzas de repulsión que experimentan las cargas de igual signo que las de la barra, y de atracción que experimentan las cargas de signo contrario a las de la barra.

ACTIVIDAD 2: ELECTRIZACIÓN DE CUERPOS

Para esta experiencia necesitas un electroscopio y un tubo de PVC de 20 cm de largo.

1. Electriza un trozo de tubo de PVC por frotamiento y acércalo al electroscopio, sin tocarlo. ¿Qué observas?
2. Sin alejar el tubo de PVC, toca la esfera superior del electroscopio con un dedo. ¿Qué sucede ahora con las laminillas metálicas?

3. Con el tubo de PVC en la misma posición retira la mano del electroscopio. ¿Qué observas ahora?
4. Finalmente, aleja el tubo de PVC. ¿En qué posición quedan las laminillas del electroscopio?
5. A partir de lo observado, define el proceso de electrización por inducción y comparte tu definición con tus compañeros(as). Si es necesario, repite la experiencia.

2. Fuerza eléctrica

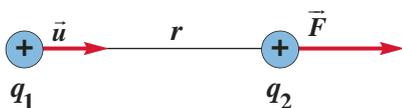
Dos cargas eléctricas del mismo signo se repelen, mientras que si son de signos contrarios se atraen. Esta fuerza eléctrica de atracción o repulsión, depende de las cargas eléctricas y de la distancia entre ellas.

2.1 La ley de Coulomb

Las primeras experiencias que permitieron cuantificar la fuerza eléctrica entre dos cargas se deben al francés **Charles Coulomb**, en el año 1785.

A partir de sus resultados, Coulomb enunció una ley que describe esta fuerza, de atracción o de repulsión, la que es conocida como **ley de Coulomb**, y que es un principio fundamental de la electrostática. Es importante notar que esta ley solo es aplicable al caso de cargas en reposo respecto de un sistema de referencia (la sala de clases, por ejemplo) que se encuentra en un medio homogéneo e isótropo. La ley de Coulomb sostiene que: **la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales (q_1 y q_2), separadas una distancia r , es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, es decir, va disminuyendo rápidamente a medida que se alejan las cargas entre sí. La ley de Coulomb se puede expresar como:**

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{u}$$



donde la fuerza \vec{F} sobre q_2 , debido a q_1 , tiene la dirección del vector unitario \vec{u} que coincide con la línea recta que une el centro de ambas cargas, cuyo sentido podrá ser atractivo o repulsivo dependiendo del signo de las cargas. K es la constante de proporcionalidad conocida como la constante de Coulomb, siendo su valor aproximado en el SI de $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. También es posible calcularla como: $K = 1/4\pi\epsilon_0$, en que ϵ_0 se denomina **permitividad eléctrica en el vacío** y su valor en el SI es de $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$.

Es importante destacar que en la ley de Coulomb solo se considera la interacción entre dos cargas puntuales a la vez; la fuerza que se determina es aquella que ejerce una carga q_1 sobre otra q_2 , sin considerar otras cargas que existan alrededor. Además, debemos tener en cuenta que el signo de las cargas nos indicará si la fuerza es de atracción (cargas con distinto signo) o de repulsión (cargas con igual signo). El sentido y dirección de la fuerza neta se infiere a partir del diagrama de fuerzas. Para resolver los ejercicios, conviene que tengamos presente las observaciones anteriores.

NOTA

Un medio material es **homogéneo** cuando presenta las mismas propiedades en cualquier región y es **isótropo** si las propiedades no dependen de la dirección de medida.



Si acercamos un objeto electrizado a un chorro fino de agua, este se desvía porque experimenta una fuerza eléctrica atractiva.



Charles Augustin de Coulomb (1736-1806). Ingeniero militar francés. Al formular la ley que lleva su nombre, impulsó el nacimiento de la teoría de campos y el electromagnetismo.

PARA CALCULAR

1. Dos cargas puntuales de $5\mu\text{C}$ y $-2\mu\text{C}$ se encuentran separadas a una distancia de 15 cm. Haz un diagrama vectorial de fuerzas y calcula el módulo de la fuerza indicando si la fuerza es atractiva o repulsiva.
2. Dos cargas puntuales se separan a una distancia tres veces mayor que la que tenían inicialmente. ¿Cómo cambia el módulo de la fuerza eléctrica entre ellas? Explica.

Ejercicio resuelto 1

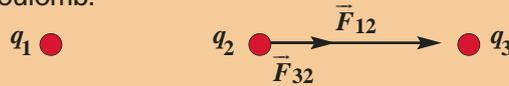
Tres cargas puntuales $q_1 = 5 \mu\text{C}$, $q_2 = 4 \mu\text{C}$ y $q_3 = -10 \mu\text{C}$, se encuentran alineadas y en reposo. Haz el diagrama de fuerzas y determina el valor y dirección de la fuerza neta que actúa sobre la carga central.



En el diagrama de fuerzas, se deben representar las fuerzas que experimenta la carga central debido a la acción simultánea de las cargas q_1 y q_3 .

\vec{F}_{12} es la fuerza que ejerce la carga 1 sobre la carga 2, y apunta hacia la derecha por ser de atracción. \vec{F}_{32} es la fuerza que ejerce la carga 3 sobre la carga 2 y apunta hacia la derecha por ser de atracción.

Para determinar la fuerza neta \vec{F}_n debemos identificar las fuerzas que actúan sobre la carga considerada y construir un diagrama vectorial, donde $\vec{F}_n = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{32}$. El módulo de estas fuerzas se pueden calcular aplicando la ley de Coulomb:



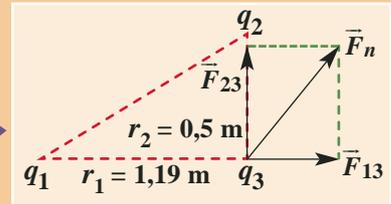
$$F_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r_1^2} = 2 \times 10^{-2} \text{ N} \quad \text{y} \quad F_{32} = K \frac{q_3 q_2}{r_2^2} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Entonces, según se ve en el diagrama de fuerzas, la suma del valor de estas fuerzas nos dará como resultado la fuerza neta sobre la carga central, o sea $F_n = 3,4 \times 10^{-2} \text{ N}$, actuando hacia la derecha. Los signos de q_1 y q_2 muestran que F_{12} es repulsiva; y los signos de q_1 y q_3 muestran que F_{32} es atractiva.

Al remplazar los valores de q_1 , q_2 , q_3 , r y $K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, que están en el enunciado obtenemos:

Ejercicio resuelto 2

Tres cargas puntuales $q_1 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ C}$, $q_2 = -0,5 \times 10^{-3} \text{ C}$, $q_3 = 0,2 \times 10^{-3} \text{ C}$, están ubicadas en los vértices de un triángulo rectángulo según se ve en la figura. Calcula la fuerza neta (magnitud y dirección) resultante sobre q_3 .



En el diagrama de fuerzas, se deben representar las fuerzas que experimenta la carga q_3 debido a la acción simultánea de las cargas q_1 y q_2 .

La fuerza \vec{F}_{13} entre q_1 y q_3 es de repulsión y la fuerza \vec{F}_{23} es de atracción según los signos de las cargas.

$$F_{13} = K \frac{q_1 q_3}{r_1^2} = 1,9 \times 10^3 \text{ N} \quad \text{y} \quad F_{23} = K \frac{q_1 q_3}{r_2^2} = 3,6 \times 10^3 \text{ N}$$

Usando la ley de Coulomb para calcular el módulo de \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} , remplazando los valores que están en el enunciado y considerando que $K = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ tenemos:

Para determinar el módulo de la fuerza neta que actúa sobre q_3 , podemos usar el teorema de Pitágoras:

$$F_n = \sqrt{F_{13}^2 + F_{23}^2} = 4,06 \times 10^3 \text{ N}$$

Finalmente, el ángulo de la fuerza neta respecto al vector \vec{F}_{13} , nos da su dirección y lo podemos determinar por la función trigonométrica:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{F_{23}}{F_{13}} = 62,3^\circ$$

Finalmente, el módulo de $F_n = 4,06 \times 10^3 \text{ N}$, cuya dirección es de $62,3^\circ$.

3. Campo eléctrico

Las cargas eléctricas generan en torno a ellas, un campo eléctrico de carácter vectorial que disminuye con la distancia. Este campo produce una fuerza eléctrica sobre una carga que se ubique en algún punto de él.

Fue Michael Faraday (1791-1867) quien introdujo la noción de **campo** en la Física para poder explicar la interacción a distancia (interactuar sin tocarse) que ocurre entre cuerpos, como sucede por ejemplo al aproximar dos imanes, y que Newton no pudo aclarar. En Física, el concepto de campo señala un sector del espacio en el que a cada punto de él, se le puede asociar un vector o una cantidad escalar.

Por ejemplo, la Tierra genera un campo gravitatorio en el espacio que la circunda ejerciendo una fuerza (el peso, que es un vector) sobre los cuerpos situados en sus cercanías. Del mismo modo, una partícula cargada Q , llamada **carga generadora**, produce un **campo eléctrico** a su alrededor. Este campo se puede detectar si colocamos una pequeña **carga de prueba** $+q_0$ puesta en el punto del espacio donde se desea medir. En ese punto, la **intensidad del campo eléctrico** \vec{E} es igual a la fuerza eléctrica \vec{F} que experimenta la carga de prueba y tiene la misma dirección que la fuerza, si q_0 es positiva; por tanto:

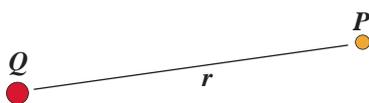
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

donde \vec{F} se obtiene según la ley de Coulomb, q_0 es la carga de prueba suficientemente pequeña por lo que su campo eléctrico es despreciable respecto de la carga Q (como el campo gravitacional de una manzana respecto al de la Tierra). La unidad de medida de la intensidad del campo eléctrico \vec{E} en el SI es N/C.

Es importante notar que el campo eléctrico no depende de la presencia ni del valor de la carga de prueba, es una propiedad del espacio que rodea a la carga generadora Q . Los campos eléctricos creados por varias cargas se pueden sumar vectorialmente en un punto del espacio.

3.1 Campo eléctrico de una partícula puntual

Vamos a utilizar la definición de campo eléctrico y la ley de Coulomb para obtener el módulo del campo eléctrico E en el punto P , que se encuentra a una distancia r de la carga generadora Q .



El campo eléctrico generado por una carga puntual tiene dirección radial y decrece rápidamente a medida que aumenta la distancia a la carga generadora.

Como la fuerza que experimenta una carga de prueba q_0 en P se obtiene como:

$$\vec{F} = K \frac{Qq_0}{r^2} \vec{u} \quad (1)$$

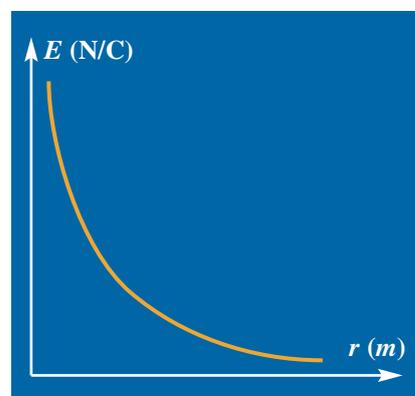
y el campo eléctrico se calcula según:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2)$$

al remplazar el valor de \vec{F} en (2), obtenemos una expresión que permite calcular el módulo de E en un punto P a una distancia r de Q :

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

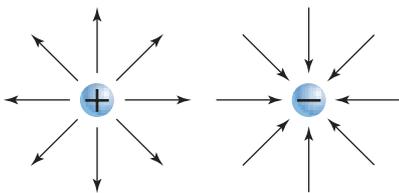
El campo generado por una carga puntual Q disminuye con el cuadrado de la distancia desde la carga. Cualquier campo eléctrico que varíe con la distancia se denomina **campo eléctrico variable** y su intensidad solo depende de la carga generadora y de la distancia entre la carga y el punto del espacio donde se calcula, independiente de que haya o no una carga de prueba en ese punto.



3.2 Líneas de campo eléctrico

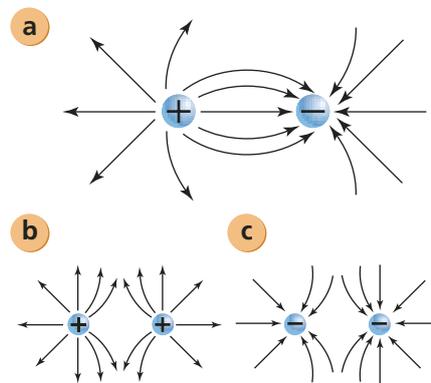
Es posible representar el campo eléctrico gráficamente a través de las **líneas de campo** o de **fuerza** las que indican la dirección, el sentido y la intensidad del campo. Estas líneas se dibujan de modo que en cada punto sean tangentes a la dirección del campo eléctrico en dicho punto. Las líneas de campo eléctrico señalan o representan las posibles trayectorias que describiría una carga de prueba positiva liberada en distintos puntos en presencia de una carga generadora.

Cargas puntuales aisladas



Para el caso de cargas puntuales, las líneas de campo eléctrico son radiales, con sentido hacia fuera en una carga positiva y hacia la carga en el caso de ser negativa. Por tanto, una carga de prueba positiva es rechazada si se ubica en el campo de una carga generadora positiva, y se atrae si se ubica en el campo de una carga generadora negativa.

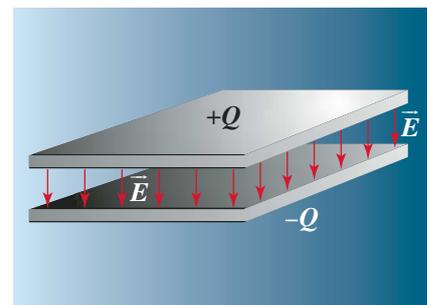
Cargas puntuales situadas a cierta distancia



En a, las líneas de campo se dirigen desde la carga positiva hacia la carga negativa. Una carga de prueba positiva en esta región se movería hacia la carga negativa. En b y c, el campo eléctrico es generado por cargas iguales donde las líneas de campo se curvan debido a que se rechazan.

Es importante notar que las líneas de campo eléctrico nunca se intersectan ni se cruzan en ningún punto del espacio y además son perpendiculares a la carga. La cantidad de líneas por unidad de área es proporcional a la intensidad del campo en un punto.

Un **campo eléctrico uniforme** tiene el mismo módulo, dirección y sentido en todos los puntos del espacio. Esto ocurre, por ejemplo, en un **condensador de placas planas** formado por dos placas paralelas entre sí, con igual carga y de signo contrario.



Entre las placas cargadas de un condensador, las líneas de campo son paralelas entre sí y se distribuyen a espacios equidistantes. Es necesario que las placas sean conductoras y estén separadas a una distancia mucho menor que el largo y ancho de ellas. En el espacio entre las placas se coloca un material dieléctrico que permite modificar la intensidad del campo, como veremos más adelante.

NOTA

Cargas extensas

Cuando las dimensiones de un cuerpo cargado no son insignificantes, se usa el concepto de carga extensa. En los cuerpos con carga extensa se considera que:

- La carga eléctrica total es igual a la suma de las cargas elementales que posee.
- Todas las cargas libres de un conductor se distribuyen sobre su superficie, por lo que en el interior la carga eléctrica es nula.
- El campo eléctrico creado en el entorno del cuerpo se calcula como si toda su carga estuviera concentrada en su centro geométrico.

PARA CALCULAR

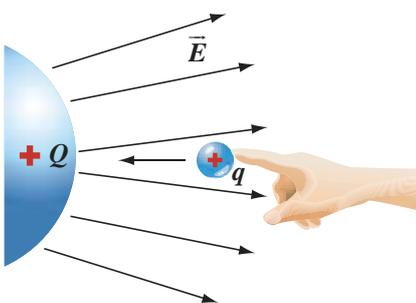
1. Determina el punto entre dos cargas puntuales de +2 mC y +5 mC en que el campo eléctrico es nulo. Ambas cargas se encuentran a 1 m de distancia.
2. Determina el vector campo eléctrico en un vértice de un cuadrado de lado 2 m producido por tres cargas iguales de -2 mC ubicadas en los tres vértices restantes.
3. Dos cargas puntuales de valor +Q y -2Q se ubican a una distancia r entre ellas. Calcula la magnitud y dirección del campo generado en un punto P situado sobre la simetral.

4. Energía potencial eléctrica

Una partícula cargada colocada en un punto de un campo eléctrico, tiene una energía potencial eléctrica con respecto a algún punto de referencia.

Para levantar un objeto desde el suelo hasta cierta altura es necesario efectuar un trabajo sobre él para vencer la fuerza de gravedad debida al campo gravitacional terrestre. El objeto en esa posición, adquiere energía potencial gravitatoria. Si levantamos un cuerpo del doble de masa, la energía potencial será también el doble, si la masa es el triple, la energía requerida será también el triple, y así sucesivamente.

Lo mismo ocurre en el caso de las cargas eléctricas. Si se quiere mover una carga de prueba q desde el infinito (región alejada donde el potencial eléctrico de la carga generadora es prácticamente nulo) hasta cierto punto dentro de un campo eléctrico generado por una carga Q , es necesario ejercer una fuerza por un agente externo, y por tanto realizar un trabajo contra las fuerzas eléctricas, por lo que la carga de prueba adquiere una cierta energía potencial eléctrica (U).



El trabajo W realizado para mover la carga de prueba corresponde al cambio de la energía potencial eléctrica, experimentado por dicha carga. De hecho, si soltamos la carga q , acelerará alejándose de Q y transformando la energía potencial ganada en cinética.

$$W = U_{\text{punto}} - U_{\text{infinito}}$$

Si definimos que en el infinito $U = 0$, tenemos que la energía potencial eléctrica que adquiere una carga puntual q a una distancia r de una carga generadora Q es:

$$U = K \frac{Qq}{r}$$

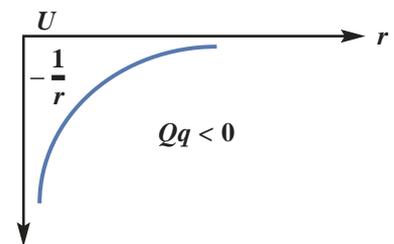
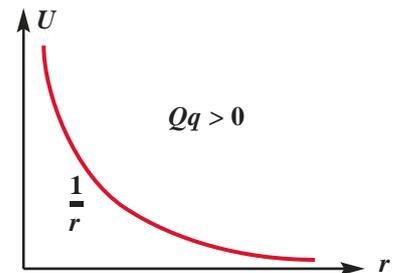
Como toda forma de energía, la unidad de la energía potencial eléctrica en el SI es el joule (**J**) y será positiva cuando la fuerza sea repulsiva.

4.1 Potencial eléctrico

Si una carga eléctrica q situada en un punto de un campo eléctrico se duplica, triplica o aumenta n veces, la energía potencial eléctrica aumentará en la misma cantidad, respectivamente; sin embargo, es más frecuente considerar, en dicho punto, el **potencial eléctrico** (V), que corresponde a la energía potencial eléctrica por unidad de carga ya que este valor será el mismo, independiente de la cantidad de cargas, o incluso si no hay cargas (es una propiedad del espacio). Por lo tanto:

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

El potencial eléctrico es una cantidad **escalar**, cuya unidad de medida es el **volt**, en honor del físico italiano **Alessandro Volta** (creador de la pila eléctrica) que corresponde a J/C . Por ejemplo, un potencial de 220 V significa que en ese punto una carga de 1 C adquiere una energía de 220 J.



La energía potencial eléctrica es inversamente proporcional a la distancia.

Para el caso de un campo eléctrico creado por una carga Q puntual, el potencial eléctrico en un punto ubicado en r se obtiene según:

$$V = K \frac{Q}{r}$$

expresión que se obtiene al relacionar la energía potencial U y el potencial eléctrico V .

4.2 Diferencia de potencial eléctrico

La energía potencial gravitatoria de un cuerpo cambia si se ubica a diferentes alturas respecto del suelo. De este modo, entre dos alturas diferentes existe una diferencia de energía potencial gravitatoria. Análogamente, ocurre en el campo eléctrico; la energía potencial eléctrica por unidad de carga o potencial eléctrico varía de acuerdo a la distancia que la separa de una carga generadora. Por lo tanto, existe una diferencia de potencial eléctrico (ΔV) entre dos puntos ubicados a diferentes distancias de la carga generadora de un campo eléctrico.

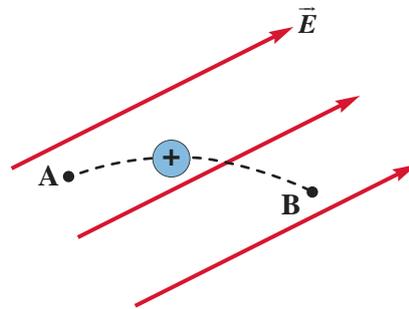
La diferencia de potencial eléctrico se define como el trabajo (W) realizado por un agente externo por unidad de carga para desplazar, independientemente de la trayectoria seguida, una carga (q) entre dos puntos de un campo eléctrico que están a diferente potencial:

$$\Delta V = \frac{W}{q}$$

Si continuamos haciendo la analogía con la energía potencial gravitatoria, al levantar a cierta altura un cuerpo, su energía potencial aumenta. Lo mismo ocurre con la energía potencial eléctrica: aumenta si la carga se mueve en el sentido contrario del campo eléctrico y disminuye al mover la carga en el sentido del campo. Por lo tanto:

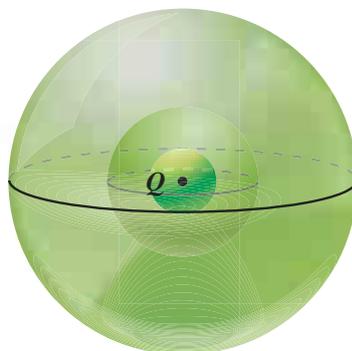
$$\Delta U = q\Delta V$$

Así, una carga q que se mueve entre dos puntos del espacio que están a diferente potencial, cambia su energía potencial en $q \Delta V$.



Si es el campo eléctrico el que realiza el trabajo (de A a B), entonces la energía potencial disminuye, si es un agente externo en contra del sentido del campo (de B a A), la energía potencial aumenta.

Los puntos que están a un mismo potencial, definen lo que se llama **superficies equipotenciales**, las que pueden tener distintas formas. Para una carga puntual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas en cuyo centro está la carga. Una partícula eléctrica que se mueve en una misma superficie equipotencial, no experimenta cambios de energía potencial. Las líneas de campo son perpendiculares a ellas.



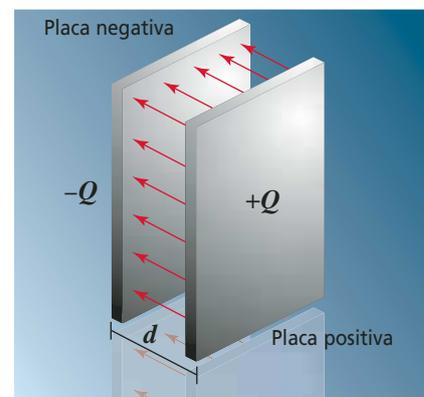
Cada una de estas esferas está a distinto potencial.

Diferencia de potencial en un campo eléctrico uniforme

Para determinar la diferencia de potencial entre dos puntos al interior de un campo eléctrico uniforme podemos usar la expresión:

$$\Delta V = E\Delta x$$

Esto significa que entre las placas de un condensador, por ejemplo, la diferencia de potencial eléctrico (o de voltaje) depende de la distancia que separa las placas (d) y del valor del campo entre ellas (E).



En un condensador de placas paralelas separadas a una distancia d , la diferencia de potencial entre sus placas se calcula como:

$$\Delta V = Ed$$

NOTA

En una pila común, la separación de cargas producida por una reacción química genera entre los extremos de ella una diferencia de potencial eléctrico o de tensión eléctrica de unos 1.5 volt. Si se conecta un cable entre los dos extremos, habrá un flujo de carga y por cada coulomb que circule, la pila le suministra 1,5 joules de energía lo que seguirá haciendo mientras siga activo el electrolito al interior de la pila.

ACTIVIDAD 3: PILA ELÉCTRICA

Necesitas un limón o una papa, una cinta de cobre y una de zinc, dos clips, una lámina de cobre y una de zinc, un diodo LED, 50 ml de solución de ácido clorhídrico (HCl), 1 vaso de precipitado de 100 ml, 30 cm de cable de cobre y un voltímetro (multitester).

1. Inserta en el limón o en la papa la cinta de cobre y de zinc en forma alternada.
2. Coloca un clip en los extremos libres de cada cinta y con trozos de alambre une cada uno de ellos al LED tal como se ve en la foto.
3. Conecta el voltímetro en paralelo a los terminales del LED.
 - ¿Puedes medir el voltaje suministrado por tu pila?
 - ¿De qué forma se deben conectar más limones o papas para obtener un voltaje mayor?
4. Retira la cinta de cobre y la de zinc del limón o la papa, con sus respectivos cables y clips.

5. Une los cables al LED y sumerge las cintas metálicas en 50 ml de ácido clorhídrico y mide el voltaje.
 - ¿Cómo son los voltajes en cada caso?
 - Averigua con tu profesor de química el tipo de reacción que se genera en ambos casos.
 - Investiga qué otros elementos pueden servir como pilas.



ACTIVIDAD 4: LÍNEAS EQUIPOTENCIALES

Formen un grupo de cuatro estudiantes y reúnan los siguientes materiales: una fuente de poder (de 1,5 a 12 volt), una cubeta, agua de la llave, voltímetro (multitester), cables, caimanos conectores, 2 láminas de cobre (para electrodos o condensadores) y papel milimetrado.

1. Ubiquen la cubeta sobre una mesa y viertan agua en su interior hasta que alcance una profundidad de unos 4 cm.
2. Construyan con las láminas de cobre unos electrodos planos e introdúzcanlos en la cubeta con agua (a una distancia de 50 cm entre ellos), y conéctenlos a una diferencia de potencial de 9 volt.
3. Conecten el voltímetro a uno de los electrodos y el otro cable conectado al voltímetro quedará como una punta de prueba.
4. Explore la región entre los electrodos planos y encuentren líneas equipotenciales.
5. Organicen el registro de información y dibujen en sus cuadernos y en el papel milimetrado, por lo menos 10 líneas equipotenciales detectadas con la punta de prueba.
6. Con el mismo par de electrodos planos anteriores, y a la misma distancia, apliquen una diferencia de potencial de 6 volt. Obtengan unas 10 líneas equipotenciales.
7. Repitan el experimento utilizando otro par de

electrodos, por ejemplo uno plano y otro puntual. Previamente, elaboren un dibujo a mano alzada de las líneas equipotenciales que esperan obtener. Verifiquen sus predicciones.

8. Repitan el experimento con dos electrodos puntuales. Introduzcan un objeto metálico en la cubeta y estudien cómo se modifican las líneas equipotenciales en las cercanías del objeto, cuando se usan los dos electrodos planos. ¿Qué ocurre si se introduce un objeto no conductor?
9. Dibujen en todos los casos anteriores sobre las líneas equipotenciales las líneas de campo eléctrico correspondientes.
10. Determinen aproximadamente el módulo y dirección del vector intensidad del campo eléctrico en diversos puntos de los diagramas anteriormente dibujados.



5. Condensadores

Un condensador es un dispositivo capaz de almacenar energía eléctrica entre sus placas cargadas. La cantidad de carga, y por tanto de energía, que puede almacenar, depende de su geometría y de la diferencia de potencial eléctrico suministrado a las placas.

Todos los computadores, televisores y equipos de música tienen en su interior unos dispositivos capaces de almacenar carga eléctrica, denominados **condensadores** (también se les llama **capacitores**). La presencia de ellos se nota, por ejemplo, cuando se "corta la luz" o se desenchufan: algunos artefactos electrónicos mantienen su programación o mantienen encendidas algunas luces por varios minutos.

Un condensador es un sistema de dos placas conductoras no conectadas entre sí y separadas mediante un dieléctrico (aislante). Estas placas tienen la misma cantidad de carga, pero con sentido contrario.

Un condensador plano consiste en dos placas metálicas separadas entre sí por una distancia d . Si se conecta una batería a las placas del condensador, se le transfiere una cantidad de carga Q que es directamente proporcional a la diferencia de potencial (ΔV) suministrada por la batería o voltaje:

$$Q = C \Delta V$$

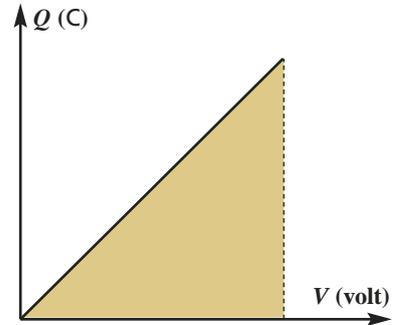
La constante de proporcionalidad C , denominada **capacidad del condensador**, indica cuánta carga Q (que corresponde a la carga de una placa) puede almacenar el condensador, sin variar el voltaje, y es:

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

En el SI, la capacidad C se expresa en una unidad llamada farad (F) en memoria de Michael Faraday y que corresponde a:

$$1 \text{ farad} = \frac{1C}{1V}$$

Como la cantidad de carga que puede almacenar un condensador es directamente proporcional a la diferencia de potencial existente entre sus placas, al graficar Q en función de V se obtiene una línea recta:



donde el área bajo la curva corresponde a:

$$A = \frac{VQ}{2}$$

y como volt • coulomb = joule, el área bajo la curva corresponde a la energía eléctrica (U) que es capaz de almacenar un condensador de capacidad C conectado a una diferencia de potencial eléctrico ΔV . Así:

$$U = \frac{VQ}{2} = \frac{CV^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

ACTIVIDAD 5: CONSTRUCCIÓN DE UNA "BOTELLA DE LEYDEN" (ACUMULADOR)

Necesitas una pequeña botella de bebida plástica, papel de aluminio, un clavo largo y un trozo de plumavit.

1. Llena completamente la botella con papel de aluminio aplastándolo lo mejor que puedas contra las paredes internas.
2. Tapa la botella con un trozo de plumavit y atraviésale el clavo hasta tocar el papel aluminio que está en el interior.
3. Cubre la parte externa de la botella con papel aluminio, de modo que no toque el cuello de la botella.
4. Para cargar el acumulador, sostén con una mano la botella tocando el aluminio del exterior, y pasa

suavemente el extremo libre del clavo por la pantalla encendida de un televisor o PC. La carga se transferirá al interior de la botella. Apaga la pantalla y vuelve a encenderla, repitiendo el proceso anterior varias veces. Se acumulará una gran cantidad de carga en el interior de la botella (ten cuidado de no tocar con tu mano el extremo del clavo, pues recibirás una descarga dolorosa).

5. Toma un trozo de alambre de cobre, amárralo a un tubo de PVC y toca simultáneamente el extremo del clavo y la cubierta exterior de la botella. ¿Qué sucedió? ¿Puedes explicarlo?

5.1 Capacidad de un condensador

La capacidad de un condensador de caras planas y paralelas depende de tres factores: del área (**A**) de las placas, de la separación (**d**) entre las placas y del dieléctrico que separa las placas según:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad \epsilon = k\epsilon_0$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío, cuyo valor es $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, y k es la constante dieléctrica adimensional, que es característica para cada material.

TABLA 2: CONSTANTES DIELÉCTRICAS A TEMPERATURA AMBIENTE

Material	Constante dieléctrica k
Aire (seco)	1,0006
Poliestireno	2,56
Papel	3,7
Caucho	6,7
Vidrio	7,6
Agua	80,0
Titanato de estroncio	233,0

5.2 Combinación de condensadores

Los condensadores se pueden conectar en serie o en paralelo, para producir variaciones en la corriente y el voltaje de los circuitos. Para representar un condensador en un circuito se utiliza el símbolo: $-||-$

En (a) los condensadores están conectados en **paralelo**; todas las placas positivas están conectadas a un punto común y las negativas a otro, de modo que cada uno está a la misma diferencia de potencial ΔV . Podemos calcular la capacidad equivalente C_{eq} de todos los condensadores considerando que:

$$Q_T = C_{eq} V \text{ y } Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Resulta:

$$Q_T = V (C_1 + C_2 + C_3)$$

Entonces:

$$C_{eq} = \frac{Q_T}{V} = C_1 + C_2 + C_3$$

Conectando de este modo los condensadores, aumenta la capacidad de acumular del conjunto y se mantiene constante el potencial. En (b) los condensadores se encuentran conectados en serie; la placa negativa de un condensador está conectada a la positiva del siguiente, y así sucesivamente, por lo que todos tienen la misma carga.

Como la diferencia de potencial total equivale a la suma de los voltajes de cada uno:

$$V_T = \frac{Q}{C_{eq}} \text{ y } V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

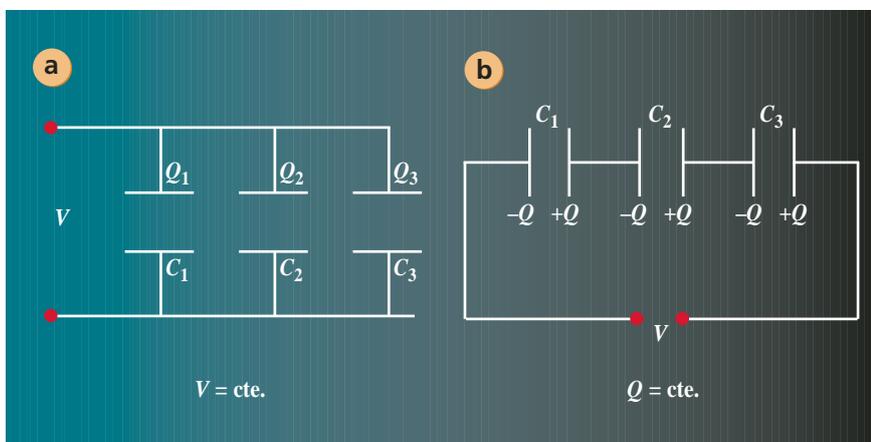
Resulta:

$$V_T = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

Entonces:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{V_T}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Al conectar los condensadores de este modo, disminuye la capacidad de acumular del conjunto.



PARA CALCULAR

1. ¿Qué separación debe existir entre las placas de un condensador plano de área 2 cm^2 que contiene papel como dieléctrico, para que su capacidad sea de 4 pF ?
2. ¿Qué significa, en términos de la capacidad de un condensador, que su dieléctrico tenga una constante $k = 20$?

6. Movimiento de cargas en un campo eléctrico

Una carga, al moverse libremente entre dos puntos de un campo eléctrico constante, experimenta una aceleración y un incremento de su energía cinética que equivale al producto de la carga por la diferencia de potencial eléctrico entre esos dos puntos.

En el movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico, se pueden dar dos situaciones: que las partículas ingresen en forma paralela a las líneas de campo o que lo hagan en forma perpendicular a estas líneas.

a. En un campo eléctrico uniforme en que $V_A > V_B$, una carga positiva inicialmente en reposo se moverá de mayor a menor potencial, mientras que una carga negativa se moverá de menor a mayor potencial. Así, los protones se mueven en la dirección en que disminuye el potencial eléctrico y los

electrones lo hacen en la dirección en que el potencial aumenta. Sin embargo, ambas cargas describirán una trayectoria rectilínea con un movimiento uniformemente acelerado paralelo a las líneas de campo, ya que la fuerza eléctrica sobre ellas es constante.

La energía potencial de la partícula inicialmente en reposo se transformará en energía cinética a medida que se mueve de acuerdo a su signo según:

$$qV = \frac{mv^2}{2}$$

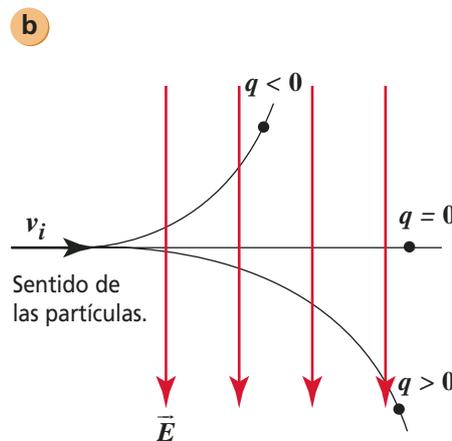
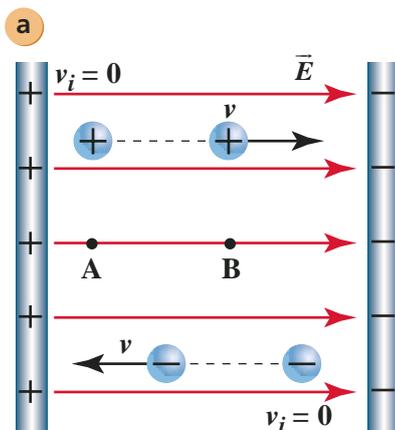
Esta expresión que muestra la conservación de la energía, permite determinar la velocidad que alcanzará la partícula al atravesar la diferencia de potencial ΔV . Es común expresar la energía de movimiento de las partículas cargadas que se desplazan en un campo eléctrico mediante la unidad **electrón volt (eV)**. Un electrónvolt corresponde a la energía que un electrón (o un protón) adquiere

cuando se acelera a través de una diferencia de potencial de un volt y su equivalencia con el joule es:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

b. Cuando la velocidad inicial de la partícula es perpendicular a las líneas del campo eléctrico, estas describen trayectorias parabólicas y con un movimiento uniformemente acelerado, curvándose en el sentido de las líneas de campo, si son positivas, y en sentido contrario, si son negativas.

Este procedimiento es útil para determinar la carga eléctrica y la masa de muestras radiactivas, radiación cósmica, etc.



NOTA

Las imágenes que observamos en los monitores de un televisor o un computador se producen por el movimiento de electrones en su interior y que chocan con la superficie interna de la pantalla. Los electrones son acelerados por un campo generado entre dos placas paralelas en que en una de ellas hay un agujero que permite la salida de los electrones hacia la pantalla. En su trayecto, los electrones son desviados por otros dos campos perpendiculares entre sí, los que modifican su intensidad causando que impacten en diferentes puntos de la pantalla, generando la imagen.

Experimento de Millikan

El desarrollo de la Física ha sido posible, muchas veces, mediante sencillos e ingeniosos experimentos como el de la gotita de aceite del físico norteamericano **Robert Millikan**, quien a principios del siglo XX (entre 1909 y 1913), diseñó un montaje experimental para *determinar la carga del electrón*. Básicamente consistía en un condensador de placas planas separadas a una distancia d y conectadas a una batería que suministraba una diferencia de potencial variable. A través de un pequeño orificio practicado en la placa superior, era posible, mediante un pulverizador, introducir diminutas gotas de aceite cargadas por fricción al espacio entre las placas. Gracias a un microscopio dotado de un retículo se podía medir el desplazamiento que una gota realizaba en cierto tiempo.

Regulando apropiadamente la diferencia de potencial entregada por la batería y considerando gotas con carga positiva, fue posible lograr que las gotas de aceite se movieran con velocidad constante debido a la acción de dos fuerzas en equilibrio: su peso \vec{P} y la fuerza eléctrica \vec{F}_e .



- Suponiendo que las gotas están en equilibrio traslacional, entonces las fuerzas que actúan son iguales y opuestas, y la ecuación del movimiento será:

$$\vec{F}_e = \vec{P}$$

- Sabemos que el módulo de \vec{F} es:

$$F_e = qE = \frac{qV}{d} \quad (1)$$

- Como $P = m g$, $m = V\rho$ y $V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi r^3$, para el caso de la gota esférica de aceite tenemos:

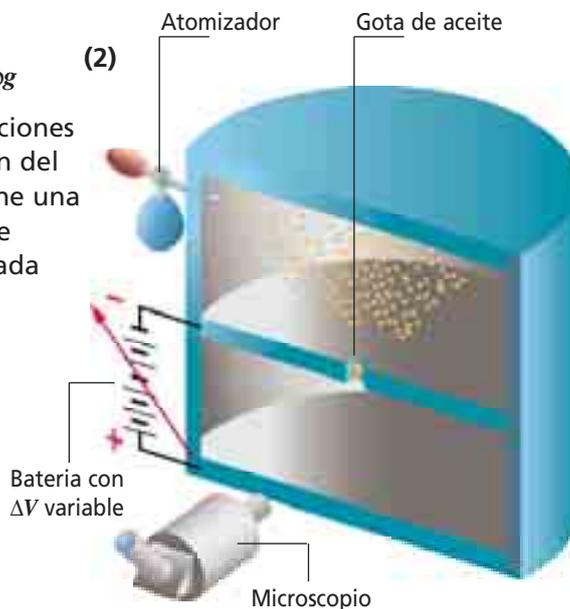
$$P = V\rho g = \frac{4\pi r^3}{3} \rho g \quad (2)$$

- Reemplazando las relaciones (1) y (2) en la ecuación del movimiento, se obtiene una expresión que permite conocer la carga de cada gota de aceite:

$$q = \frac{4\pi}{3V} r^3 \rho g d$$

Luego de realizar el cálculo para un número cercano a las 150 gotas, y usando técnicas estadísticas adecuadas, Millikan encontró que los valores de la carga eléctrica q en cada una de ellas eran siempre múltiplos enteros de una carga elemental e , de un valor $1,6 \times 10^{-19}$ C. Este hecho reveló que cualquier carga observable en la naturaleza *debía ser un múltiplo entero de la carga elemental*, es decir: $q = ne$, con n perteneciente a \mathbb{Z} . Por lo tanto, la carga del electrón constituía la unidad fundamental de carga eléctrica. Se concluyó que no era posible encontrar un cuerpo o una partícula en estado libre que tuviese una carga eléctrica equivalente a una fracción de la carga elemental.

Montaje del experimento de Millikan.



TALLER 1: MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA EN UN CAMPO ELÉCTRICO

Conéctate a la página www.santillana.cl/fis4 y abre el Taller 1 de la Unidad 1.

Allí encontrarás una actividad donde podrás observar la trayectoria seguida por una partícula al interior de un campo eléctrico.

7. Fenómenos magnéticos

El campo magnético se origina por el movimiento de las cargas eléctricas. Por esto, alrededor de un cable conductor por el que circula una corriente se crea un campo magnético que se puede representar mediante líneas circulares. Análogamente, una carga en movimiento en un campo magnético experimentará una fuerza magnética.

El fenómeno del magnetismo es una propiedad que se manifiesta en forma natural en ciertas sustancias como el hierro, cobalto y níquel, principalmente,

OTRO PUNTO DE VISTA

El campo magnético y las aves migratorias

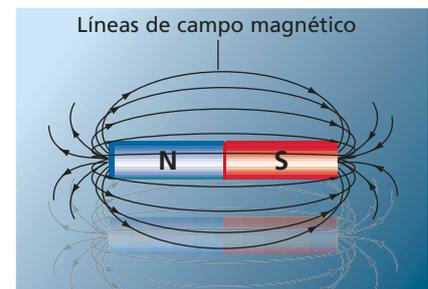
Las aves migratorias pueden orientarse debido a la capacidad que poseen para detectar la intensidad y la dirección del campo magnético terrestre. Dicha capacidad se explicaría por dos mecanismos complementarios. Uno está relacionado con la acción de la luz. Las moléculas de rodopsina que se encuentran en las células de la retina del ojo absorben fotones y se convierten en pequeños imanes momentáneos, alineándose en la dirección del campo magnético. Este mecanismo se complementaría con el efecto producido por cristales de magnetita presentes en el cráneo de las aves. Recordemos que la magnetita posee propiedades magnéticas que la hacen comportarse como una brújula.

y que se caracteriza por la aparición de fuerzas de atracción o de repulsión entre imanes. Esto sugiere que existen dos zonas magnéticas llamadas polo norte y sur; concepto que introdujo en 1600, el físico **William Gilbert**. El primer imán utilizado fue un mineral de hierro de color negro que recibió el nombre de magnetita, pues provenía de la región de Magnesia, en Asia, y ya era conocida hace más de 2.500 años por las culturas china y griega.

Al igual que una carga crea un campo eléctrico en su entorno y una masa crea un campo gravitatorio, un imán crea un **campo magnético** a su alrededor, que se detecta por la aparición de fuerzas magnéticas, y que se puede representar mediante **líneas de campo magnético** o **de fuerza magnética**; concepto acuñado en 1831 por Faraday. Es importante notar que no existen los monopolos magnéticos, como lo constató **De Maricourt**: al separar un imán en dos, siempre resultan dos nuevos imanes, con dos polos cada uno. El campo magnético se mide en cada punto mediante el vector

intensidad de campo magnético (\vec{B}), que es tangente a las líneas de campo magnético. Estas tienen las siguientes propiedades:

- En el exterior del imán, cada línea se orienta desde el polo norte al polo sur.
- A diferencia de las líneas de campo eléctrico, las líneas de campo magnético son cerradas y no se interrumpen en la superficie del imán.
- El vector de campo magnético en cada punto del espacio es tangente a la línea de campo que pasa por ese punto.
- La cantidad de líneas por unidad de área en la vecindad de un punto, es proporcional a la intensidad del campo en dicho punto.
- La líneas nunca se intersectan ni se cruzan en ningún punto del espacio.



ACTIVIDAD 6: LÍNEAS DE CAMPO MAGNÉTICO

Necesitas dos imanes rectos, una hoja blanca y polvo o limadura de hierro.

1. Coloca el imán sobre una mesa, y sobre él un papel blanco. Espolvorea la limadura de hierro sobre la hoja golpeándola suavemente con un dedo para que se acomode en la dirección de las líneas del campo magnético. Dibuja en tu cuaderno la "figura" que se forma.

2. Repite la actividad poniendo bajo la hoja dos imanes en distintas posiciones y dibuja en tu cuaderno las formas que adoptan las limaduras de hierro.
3. Observa con atención y responde: ¿cómo se pueden identificar los polos?, ¿en qué parte del imán están más concentradas las líneas del campo?, ¿cómo le llamarías a esa zona?

7.1 Electricidad y magnetismo

En 1820, el profesor de Física danés **Hans Christian Oersted** descubrió en forma casual durante una clase, que cerca de un cable por el que circulaba corriente eléctrica la aguja de una brújula se desviaba de la dirección norte-sur. A partir de esta experiencia, concluyó que *el magnetismo no solo es causado por los imanes sino que también puede ser producido por la corriente eléctrica*. Este hecho se conoce como el **efecto Oersted** y fue el primer paso que conectaba la electricidad y el magnetismo, en un área que posteriormente se llamó **electromagnetismo**.

Poco tiempo después, el francés **André-Marie Ampère** descubrió que, así como dos imanes pueden atraerse o repelerse entre sí, dos corrientes eléctricas también interactúan magnéticamente. Planteó además que el magnetismo natural era producido por pequeñas corrientes eléctricas que actuaban a nivel molecular. Al mismo tiempo, **Michael Faraday** empezó a desarrollar ideas sobre la teoría de campos,

concluyendo que se pueden generar corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos variables.

El aporte que cerró el círculo fue hecho por **James Clerk Maxwell**, quien en la década de 1860 descubrió que era posible generar campos magnéticos a partir de campos eléctricos variables.

Todos estos estudios permitieron establecer que *la electricidad y el magnetismo son fenómenos íntimamente relacionados*, siendo, en realidad, dos aspectos diferentes derivados de una misma propiedad de la materia: la **carga eléctrica**.

7.2 Campo magnético creado por una corriente eléctrica

En un conductor recto muy largo por el que circula una corriente i , el campo magnético alrededor de él es perpendicular a la corriente, y las líneas del campo toman la forma de anillos concéntricos en torno al alambre, donde la dirección del vector campo magnético es tangente en cada punto a esas líneas.

Su intensidad (módulo) (B) en un punto ubicado a una distancia (r) de él se obtiene según:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

El valor de (μ_0) llamado permeabilidad magnética en el vacío es de $4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A.

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de un campo magnético generado por una corriente eléctrica, se utiliza la llamada "regla de la mano derecha". Esta consiste en apuntar el pulgar derecho en el sentido de la corriente, y el sentido en el que cierran los demás dedos corresponderá al sentido del campo magnético. Donde las líneas de campo estén más juntas el campo es más intenso, y viceversa (ver figura).



ACTIVIDAD 7: EXPERIMENTO DE OERSTED

Consigan una batería de 9V, un trozo de alambre de cobre grueso y una brújula.

1. Ubiquen la brújula sobre la mesa y el alambre recto sobre ella apuntando en la dirección norte-sur.
2. Conecten ahora la batería a los

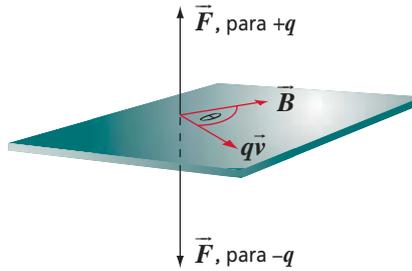
extremos del alambre y respondan: ¿hacia dónde se desvía la aguja de la brújula? El campo magnético generado por el alambre con corriente, ¿es paralelo o perpendicular al alambre? ¿Qué sucederá si se invierte el sentido de la corriente?

7.3 Fuerza magnética sobre una carga eléctrica

Cuando una partícula cargada se encuentra quieta dentro de un campo magnético, no experimenta ninguna fuerza. Pero si está en movimiento en una dirección distinta de las líneas de campo magnético, sufre una fuerza magnética que la desviará de su curso. Esta fuerza ejercida por un campo magnético sobre una carga (que pertenece a un grupo de cargas) en movimiento, es proporcional a la carga q y a la componente de la velocidad de la carga en la dirección perpendicular a la dirección del campo magnético. La expresión vectorial es:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

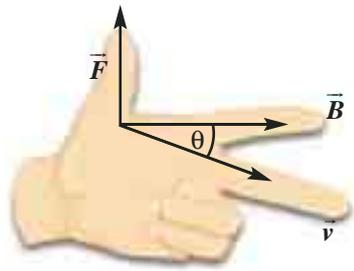
El sentido de esta fuerza para una carga positiva, se puede determinar mediante la aplicación de la "regla de la mano izquierda", ubicando el dedo índice en el sentido de \vec{B} y el dedo del medio en el sentido de \vec{v} . La posición en que queda el dedo pulgar ubicado perpendicularmente a los otros dos, señala el sentido de \vec{F} . Si la carga es negativa, se invierte el sentido de la fuerza.



La dirección de la fuerza magnética es perpendicular tanto al campo magnético como a la velocidad de la partícula. Su intensidad se puede calcular mediante la siguiente relación escalar:

$$F = qvB \text{ sen } \theta$$

En ella, θ es el ángulo formado por los vectores velocidad de la partícula y campo magnético.



"La regla de la mano izquierda" de Fleming indica la relación entre el sentido y la dirección de la velocidad de la partícula positiva v , del campo B y de la fuerza magnética F .

Al examinar la relación anterior, podemos ver que la fuerza es máxima cuando los vectores velocidad y campo magnético son perpendiculares entre sí, mientras que es nula si ambos vectores son paralelos.

Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad, su trabajo al mover la carga es nulo. Por tanto, la fuerza magnética no produce cambio ni en la magnitud de la velocidad ni en la energía cinética de la partícula; solo cambia la dirección de la velocidad.

Cuando la partícula se mueve en una región en la que hay un campo magnético y un campo eléctrico, la fuerza total sobre ella es la suma de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. Esto es:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

La expresión anterior se conoce como **fuerza de Lorentz**, llamada así debido a que fue identificada por primera vez por Hendrik Lorentz.

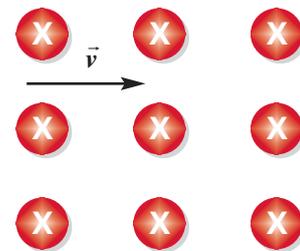
NOTA

Para representar un campo magnético perpendicular al plano de las páginas, usaremos la siguiente convención:

- X : cuando el campo entra al plano.
- : cuando el campo sale del plano.

PARA CALCULAR

Un electrón se mueve a $5,7 \times 10^6$ m/s tal como se indica en la figura, en presencia de un campo magnético uniforme de $1,4 \times 10^{-2}$ T que entra al plano. Calcula y dibuja en el diagrama la fuerza magnética experimentada por el electrón. ¿Qué trayectoria describirá el electrón?



Ejercicio resuelto 3

Trayectoria descrita por una partícula cargada al ingresar a un campo magnético.

Una partícula de masa m y carga q se mueve al interior de un campo magnético B , con una velocidad v perpendicular al vector campo magnético. Esta partícula describe una trayectoria circular de radio r debido a la fuerza magnética que actúa como fuerza centrípeta; es decir:

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

Si despejamos r , vemos que el valor del radio de la trayectoria circular descrita por la carga queda dado por la relación:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Ejercicio resuelto 4

Un electrón entra a un campo magnético uniforme perpendicular a la velocidad. Si el radio de la trayectoria que describe el electrón es de 10 cm, calcula la velocidad v del electrón si el campo magnético es 5×10^{-4} T. Encuentra también, el período del movimiento circular del electrón.

La fuerza magnética es la que causa la trayectoria circular y corresponde a la fuerza centrípeta, por tanto:

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

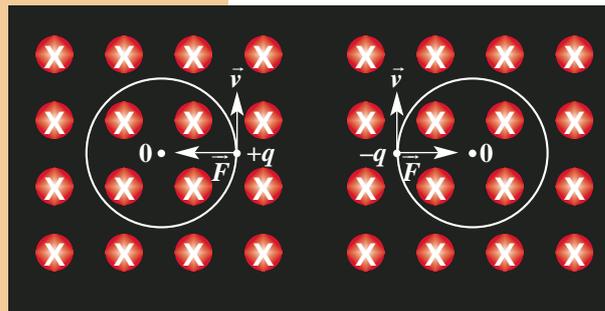
entonces, despejando v resulta:

$$v = \frac{qrB}{m} = 8,79 \times 10^6 \text{ m/s}$$

Para calcular el período podemos usar la expresión:

$$T = \frac{\Delta x}{v} = \frac{2\pi r}{v} = 7 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Finalmente, la velocidad es de $8,79 \times 10^6$ m/s, y el período es de 7×10^{-8} s.



En ambas figuras la fuerza magnética apunta hacia el centro de la curvatura 0.

Recuerda que el módulo de la fuerza centrípeta se puede calcular como: $F = mv^2/r$.

Al reemplazar los valores que están en el enunciado del problema resulta:

Al reemplazar los valores que están en el enunciado del problema resulta:

PARA CALCULAR

- Un electrón se mueve a 5×10^7 m/s perpendicularmente a un campo uniforme de intensidad 4×10^{-2} T. Si la masa del electrón es de $9,1 \times 10^{-31}$ kg y su carga de $-1,6 \times 10^{-19}$ C, ¿cuál es el radio de su trayectoria?
- Mediante una fuente de poder se produce un haz de electrones que describe una circunferencia de 15 cm de diámetro cuando se le somete a un campo magnético uniforme de 7,6 mT perpendicular a su velocidad.
 - ¿Qué rapidez llevarán los electrones del haz?
 - ¿Qué tensión debió aplicar la fuente de poder al haz electrónico?

Experimento de Thomson

En 1897, el norteamericano **Joseph John Thomson**, haciendo uso de un tubo de rayos catódicos, encontró experimentalmente la razón entre la carga y la masa del electrón e/m (carga específica). La figura representa el experimento de Thomson donde los electrones, acelerados desde el cátodo mediante una diferencia de potencial V_a , eran desviados por un campo magnético perpendicular a la trayectoria de los electrones.

- La fuerza magnética corresponde a la fuerza centrípeta:

$$m \frac{v^2}{r} = evB \Rightarrow v = \frac{eBr}{m} \quad (1)$$

- La energía cinética adquirida por un electrón de masa m es:

$$m \frac{v^2}{2} = eV_a \quad (2)$$

- Sustituyendo la expresión (1) en la expresión (2) resulta:

$$m \frac{\left[\frac{eBr}{m} \right]^2}{2} = eV_a \quad (3)$$

- Luego la razón e/m resultará:

$$\frac{e}{m} = \frac{2V_a}{B^2 r^2}$$

- Midiendo el voltaje o diferencia de potencial V_a entre las placas, el radio r de la trayectoria descrita por el electrón y la intensidad del campo magnético aplicado (B), Thomson obtuvo un valor (módulo) para la carga específica del electrón:

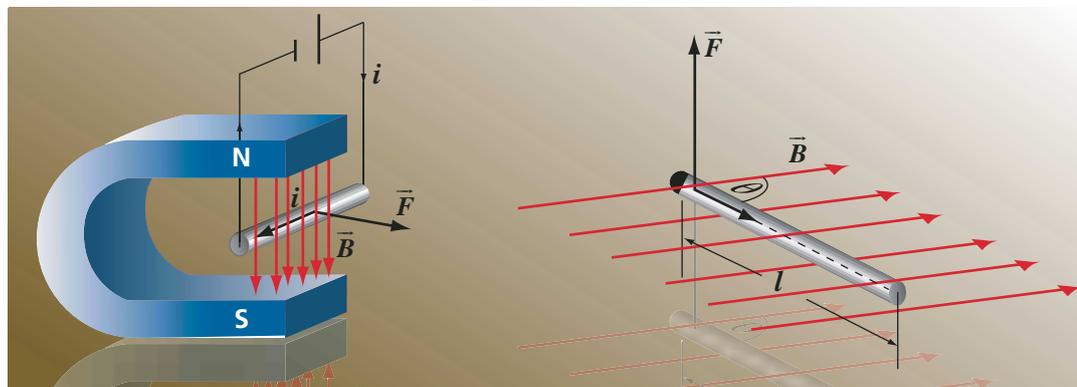
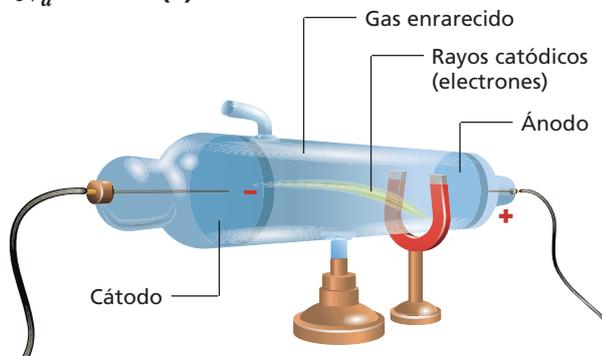
$$\frac{e}{m} = 1,76 \times 10^{11} \frac{C}{kg}$$

7.4 Fuerza magnética sobre una corriente eléctrica

Así como una carga eléctrica en movimiento (no paralelo a la dirección de \vec{B}) es afectada por una fuerza magnética, es natural que esta fuerza también afecte a una corriente eléctrica considerada como un gran número de cargas en movimiento, y al conductor que las contiene. Por tanto, un conductor recto de longitud l que porta una intensidad de corriente i en forma perpendicular a un campo magnético \vec{B} , experimenta una fuerza magnética cuyo módulo está dado por la relación:

$$F = ilB$$

La fuerza es nula si el conductor es paralelo al campo y máxima si es perpendicular. La dirección de esta fuerza es perpendicular al plano formado por el conductor y las líneas de fuerza magnéticas, y su sentido se puede determinar utilizando la regla de la mano izquierda de Fleming.



Un conductor por el que circula una corriente, ubicado en un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a la corriente y al campo magnético desviándolo hacia un lado u otro, dependiendo del sentido de la corriente y de la polaridad del imán.

ACTIVIDAD 8: FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN CONDUCTOR

1. Necesitas una batería de 9 V, un cable delgado (como el usado en las bobinas de los motores eléctricos de juguete), y un imán en lo posible de herradura o dos imanes enfrentados por sus polos opuestos.
 2. Arma el sistema como muestra la figura y luego conecta y desconecta la corriente varias veces.
 - ¿Se desvía el alambre con corriente que está dentro del campo magnético? ¿En qué dirección?

- ¿Qué pasa si se invierte el sentido de la corriente eléctrica que pasa por este conductor?



El motor eléctrico de corriente continua (c.c.)

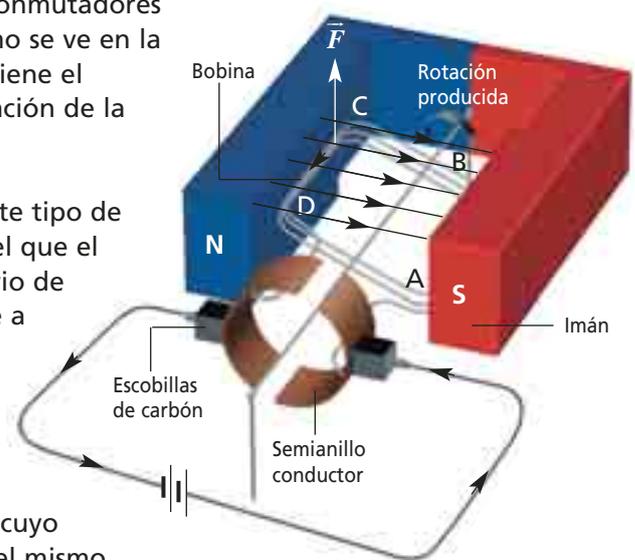
Una de las aplicaciones más útiles de la fuerza experimentada por un conductor eléctrico en presencia de un campo magnético perpendicular a él es el **motor eléctrico** que transforma energía eléctrica en energía mecánica.

El campo magnético es generado por un imán permanente en el que se encuentra una bobina (conjunto de espiras de un conductor) cuyos extremos están unidos a un par de semianillos conmutadores de la corriente que al girar lo hacen apoyados en escobillas de carbón que están fijos. Al conectar las escobillas con una fuente de poder o pila, la corriente circulará en la bobina en un sentido por AB y en sentido

opuesto en CD, de manera que la fuerza sobre cada tramo será tal que causará un giro en la bobina. Para evitar el movimiento de vaivén debido al sentido único de la corriente (al dar media vuelta la corriente tendría sentido opuesto respecto de B) los conmutadores se interrumpen como se ve en la figura y así se mantiene el movimiento de rotación de la bobina.

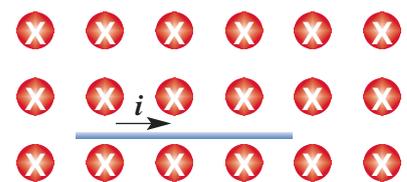
Una variación de este tipo de motor es aquel en el que el movimiento rotatorio de la espira se produce a través de una fuerza externa. En este caso se genera una corriente de intensidad variable cuyo sentido siempre es el mismo.

Este tipo de motor es el que encontramos en el dínamo de una bicicleta, donde se transforma el movimiento de la rueda en una corriente eléctrica que permite encender una ampulleta.



PARA CALCULAR

1. Un conductor recto de 50 cm porta una corriente de 1,6 A en presencia de un campo magnético de $1,5 \times 10^{-1}$ T, tal como se muestra en la figura. Calcula la fuerza magnética sobre el conductor dibujando su sentido y dirección.
2. Un conductor de 1 m se encuentra perpendicular a un campo magnético. Cuando porta una intensidad de corriente de 20 A se ejerce sobre él una fuerza de 1 N. ¿Cuál es la intensidad del campo magnético?



7.5 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Cuando dos conductores eléctricos que portan corriente se encuentran próximos entre sí, experimentan una fuerza atractiva o repulsiva debido a la interacción entre los campos magnéticos generados por las corrientes que circulan por ellos. El módulo del campo magnético B_1 creado por un conductor largo y recto, de longitud l , que porta una corriente i_1 a una distancia r de él, estará dado por:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi r}$$

El sentido del campo magnético se determina aplicando la regla de la mano derecha (el dedo pulgar indica el sentido de la

corriente y la punta del resto de los dedos indica el sentido de B). Si un segundo conductor del mismo largo, que porta una corriente i_2 , es colocado a una distancia r y paralelo al conductor anterior, experimentará una fuerza magnética \vec{F} cuyo módulo está dado por:

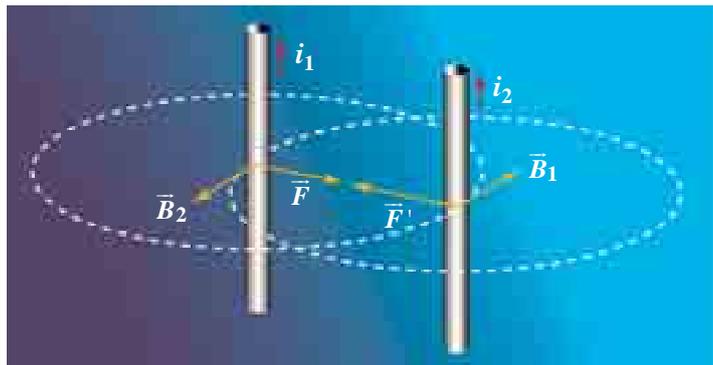
$$F = i_2 l B_1$$

o en forma equivalente:

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi r}$$

Al calcular la fuerza producida por i_2 sobre i_1 , resulta una fuerza (F') del mismo módulo y dirección que F , pero de sentido opuesto.

Cuando las corrientes recorren los conductores en el mismo sentido estos se atraen; si las corrientes tienen sentido opuesto, se repelen.



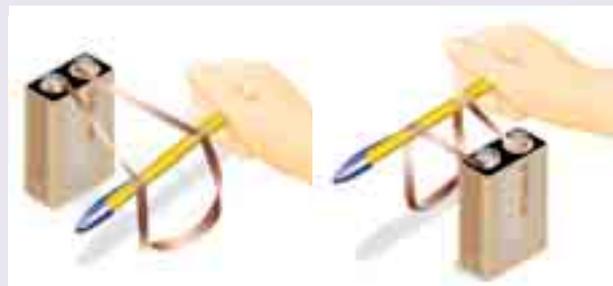
PARA CALCULAR

- La figura representa 2 alambres rectos paralelos que conducen sendas intensidades de corriente saliendo del plano.
 - Dibuja el vector campo magnético creado por el conductor 1 en el lugar ocupado por el conductor 2.
 - Dibuja el vector campo magnético creado por el conductor 2 en el lugar ocupado por el conductor 1.
 - Dibuja el vector fuerza magnética actuando sobre el conductor 1 y sobre el conductor 2.
- Encuentra la fuerza que experimentan dos alambres de 10 m de largo paralelos y separados 3 cm entre sí, que portan intensidades de corriente de 11 A y 8 A, si:
 - fluyen en el mismo sentido;
 - fluyen en sentidos contrarios.



ACTIVIDAD 9: FUERZA ENTRE CONDUCTORES

- Necesitas dos baterías de 9V y dos trozos largos de cintas de casete.
- Conecta los extremos de cada trozo de cinta a los polos de las baterías de modo que las corrientes que circulan tengan la misma dirección y acércalas en forma paralela. ¿Puedes observar alguna interacción entre las cintas conductoras? Si las corrientes tienen direcciones opuestas, ¿hacia dónde tienden a moverse ambas cintas cuando las acercas?



Resumen

Dos cargas puntuales interactúan mediante la fuerza de Coulomb. Dicha fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Toda carga eléctrica genera un campo eléctrico que puede representarse mediante líneas de fuerza eléctrica. En el caso de las cargas puntuales dicho campo varía con la distancia a la carga, mientras que en un condensador de placas paralelas, el campo es uniforme y constante en la zona entre las placas.

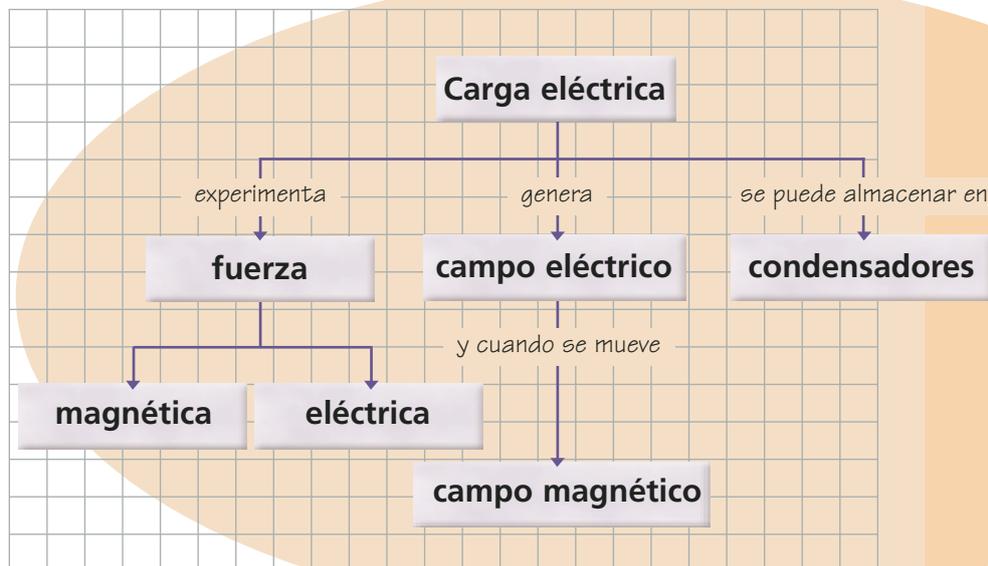
Cada punto de un campo eléctrico tiene asociado un potencial eléctrico. Cuando una carga es colocada en un punto, adquiere energía potencial eléctrica que es proporcional al potencial eléctrico en ese punto; sin embargo, es más frecuente usar en Física el concepto de diferencia de potencial entre dos puntos.

Los condensadores tienen la capacidad de almacenar carga y energía eléctrica. Su capacidad depende del área de las placas, de la distancia que las separa y del dieléctrico entre sus placas.

Si una carga se mueve al interior de un campo magnético, experimenta una fuerza magnética. Lo mismo le sucede a un conductor que porta una corriente. Esta fuerza es perpendicular a la dirección del campo magnético y a la dirección de la corriente o de la carga en movimiento. Por ello, dos conductores eléctricos pueden interactuar, como si fuesen dos imanes permanentes, con fuerzas atractivas o repulsivas.

A continuación te entregamos un mapa conceptual general de los contenidos del tema: **Fuerza eléctrica y magnetismo**.

Mapa conceptual



- Ahora elabora en tu cuaderno tu propio mapa conceptual, incorporando los conceptos del mapa conceptual propuesto y otros como los que aparecen en el glosario de la página siguiente.
- Muestra tu mapa conceptual a tu profesor o profesora para que lo revise.

Glosario

Campo eléctrico. Región del espacio tal que en cada punto de él una carga eléctrica experimentará una fuerza eléctrica de atracción o de repulsión.

Campo magnético. Región del espacio tal que en cada punto de él se manifiesta una fuerza magnética de atracción o de repulsión.

Carga eléctrica. Característica de las partículas elementales de la materia y que se manifiesta como una interacción atractiva o repulsiva.

Condensador. Dispositivo eléctrico capaz de almacenar carga eléctrica. Los más comunes son los de placas paralelas separadas por un dieléctrico o aislante.

Coulomb. Unidad de medida de la carga eléctrica. 1 C corresponde a la magnitud de la carga eléctrica de aproximadamente $6,3 \times 10^{18}$ electrones.

Diferencia de potencial. Diferencia algebraica de potencial eléctrico entre dos puntos de un campo eléctrico.

Electrización. Pérdida o ganancia de carga negativa de un cuerpo o un átomo mediante algún método como la fricción o el contacto.

Fuerza de Lorentz. Suma de las fuerzas magnética y eléctrica que experimenta una carga en un campo magnético y eléctrico.

Fuerza eléctrica. Fuerza atractiva o repulsiva de carácter eléctrico que experimenta una carga en presencia de un campo eléctrico.

Fuerza magnética. Fuerza atractiva o repulsiva de carácter magnético debido a la presencia de un campo magnético.

Ley de Coulomb. Expresión cuantitativa de la fuerza de atracción o repulsión electrostática, planteada por Charles de Coulomb.

Líneas de campo o de fuerza. Método gráfico de líneas rectas o curvas mediante el cual se representa el campo eléctrico y magnético. La fuerza eléctrica o magnética es tangente en cada punto de las líneas.

Potencial eléctrico. Cantidad de energía potencial eléctrica por unidad de carga.

Superficies equipotenciales. Conjunto de puntos que están a un mismo potencial.

Física aplicada

Las jaulas de Faraday

En un conductor, las cargas eléctricas móviles se distribuyen en la superficie, de tal manera que el campo eléctrico en el interior es nulo.

Al respecto, Michael Faraday observó que una estructura metálica en forma de jaula actúa como una pantalla: los cuerpos que esta contiene quedan aislados de la acción de los campos eléctricos externos, permaneciendo únicamente la de los campos magnéticos.

Esta propiedad de los conductores hace que sean útiles, por ejemplo, para proteger un artefacto electrónico del efecto de una actividad eléctrica externa. Esta es la razón por la que la mayoría de los componentes electrónicos se rodean de una caja metálica, llamada **jaula de Faraday** (que puede ser una malla o un recipiente metálico). Estas cajas impiden que las cargas eléctricas que puedan llegar al aparato, ingresen al interior. En los equipos de audio, la envoltura metálica evita que un campo electromagnético exterior interfiera con la señal sintonizada.

Los teléfonos celulares utilizan señales electromagnéticas y depende de la libre circulación de estas para posibilitar la comunicación telefónica. La situación se complica cuando la comunicación debe establecerse desde o hacia bajo tierra, como en el metro. Años atrás, no era posible la comunicación por celular en el metro. El problema se generaba porque tanto las paredes como los techos de los túneles se encuentran revestidos con mallas de acero (que los hace flexibles), que actúan como jaula de Faraday, lo que imposibilita el paso de las señales electromagnéticas. Por esta razón se instalaron varios kilómetros de antenas especiales para permitir conectarse con el exterior.

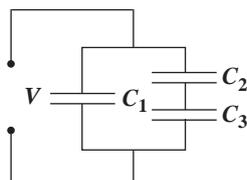


La cubierta metálica de una C.P.U. (unidad central de procesos) actúa como jaula de Faraday.

Comprueba lo que sabes

- En las siguientes afirmaciones, indica verdadero o falso según corresponda.
 - Dos electrones se atraen entre sí.
 - Electrostática significa cargas en movimiento.
 - La fuerza eléctrica se llama ley de Coulomb.
 - La energía eléctrica se mide en watts.
 - Al interior de un conductor el potencial es nulo.
 - Las líneas de campo eléctrico son imaginarias.
 - El campo eléctrico en el interior de un condensador de placas paralelas es constante.
 - La unidad de medida para la carga de un condensador es el farad.
 - El espacio que rodea a una carga eléctrica está vacío.
 - Las líneas de campo magnético son cerradas.
 - Las líneas de campo eléctrico salen perpendiculares desde una carga positiva.
 - La causa del magnetismo se debe a la masa de las partículas.
 - Los imanes son siempre monopolos magnéticos.
- De las siguientes afirmaciones relativas a la electrostática y al campo eléctrico, es verdad que:
 - la Tierra atrae los cuerpos por interacción electrostática.
 - los núcleos atómicos son neutros.
 - una carga neutra atrae cargas positivas y negativas.
 - existen cargas negativas y positivas en forma aislada.
- Un sistema de partículas consta de dos cargas eléctricas fijas, de igual signo, separadas un metro de distancia. Relativo al sistema, es correcto afirmar que:
 - las cargas eléctricas crean una fuerza eléctrica atractiva.
 - existe un punto en la línea recta que une las cargas, donde el campo es nulo.
 - el potencial electrostático total del sistema es máximo en el infinito.
 - si la distancia de separación aumenta, la energía del sistema aumenta.
- Considera un sistema de dos cargas puntuales q separadas una de la otra por una distancia l . Si una de las cargas cambia de signo y la distancia se acorta hasta $1/2 l$, entonces:
 - el módulo de la fuerza disminuye a la mitad.
 - la fuerza cambia de sentido convirtiéndose en atractiva.
 - el módulo de la fuerza aumenta cuatro veces.
 - la fuerza cambia de sentido convirtiéndose en repulsiva.

De las afirmaciones, son correctas:

 - I y II
 - II y III
 - I y IV
 - II y IV
- Un ión K^+ , se encuentra a 100 nm de distancia de un ión Ca^{++} . ¿Cuál es la fuerza eléctrica entre los iones?
 - $2,3 \times 10^{-11}$ N.
 - $-2,3 \times 10^{11}$ N.
 - $2,3 \times 10^{12}$ N.
 - $4,6 \times 10^{-14}$ N.
- La expresión siguiente (JV/ WC) corresponde a una unidad de:
 - corriente.
 - voltaje.
 - potencia.
 - resistencia.
- Se tiene un circuito con condensadores como se muestra en la figura.
 

La expresión correcta para la capacidad equivalente es:

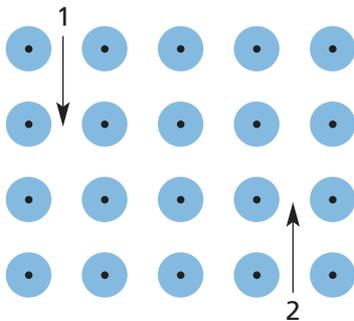
 - $C_1 + C_2 + C_3$
 - $C_1 + (C_2 + C_3)/(C_2 \times C_3)$
 - $C_1 - (C_2 + C_3)$
 - $C_1 + (C_2 \times C_3)/(C_2 + C_3)$

Comprueba lo que sabes

8. ¿Cuál será el radio de giro de un electrón que viaja en una órbita circular con velocidad tangencial constante de 9×10^6 m/s, si está sometido a un campo magnético de 2×10^{-3} T?

- A. 2,6 mm
- B. 2,6 cm
- C. 2,6 m
- D. 2,6 nm

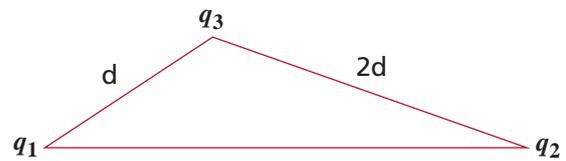
9. Dos partículas cargadas y con igual rapidez se desplazan perpendicularmente a un campo magnético uniforme. La partícula 1 es un electrón, y la partícula 2 es un positrón (antipartícula del electrón con igual masa pero con carga eléctrica contraria).



La trayectoria de las partículas en el interior del campo magnético es:

- A.
- B.
- C.
- D.
- E.

10. En los vértices de un triángulo rectángulo de catetos d y $2d$ se encuentran 3 partículas cargadas. Si la fuerza eléctrica sobre q_3 apunta hacia arriba, podemos afirmar que:



- I. q_1 y q_2 son de igual signo.
- II. q_2 y q_3 son de igual signo.
- III. $q_2 = 2q_1$

De estas, son correctas:

- A. I y II
- B. I y III
- C. II y III
- D. Todas.
- E. Ninguna.

11. Los pájaros generalmente pueden posarse sobre uno de los cables energizados del tendido eléctrico sin accidentarse debido a que:

- A. sus garras son muy buenos aisladores eléctricos.
- B. la cantidad de corriente que circula por dichos conductores no suele ser tan grande como para afectarlos.
- C. no están conectados a tierra.
- D. la mayoría de los cables del tendido eléctrico están revestidos de un plástico aislador.
- E. la corriente eléctrica en esos cables circula solo por su interior, entonces no se ven afectados por la corriente eléctrica por la misma razón que uno no se moja si toca una cañería que conduce agua.

12. Un alambre recto conduce una corriente eléctrica en sentido sur-norte. Una brújula se encuentra encima del conductor. La aguja de la brújula apunta hacia el:

- A. Norte.
- B. Sur.
- C. Este.
- D. Oeste.
- E. Noreste.



¿Cómo se originan los rayos?

El fenómeno de las tormentas eléctricas es uno de los más abundantes en la Tierra. Si observáramos el cielo antes de una tormenta eléctrica, podríamos reconocer unas nubes enormes con forma de yunque, en cuyo interior se generan los rayos. El espesor de estas nubes es de varios kilómetros y están a una altura media de dos kilómetros sobre el suelo. Al interior de estas nubes, donde hay gotas de agua o cristales de hielo, se produce una separación de cargas eléctricas generada por diversos fenómenos de convección y de electrización. Generalmente la parte superior, formada por cristales de hielo, se carga positivamente, mientras que la parte inferior queda con carga negativa. A menudo, en la parte negativa de la nube se encuentra un sector positivo que aún no tiene explicación.

Un rayo es una descarga eléctrica que golpea la tierra, proveniente de la polarización que se produce entre las moléculas de agua de una nube cuyas cargas negativas son atraídas por la carga positiva de la tierra, provocándose un paso masivo de millones de electrones a esta última.

Se estima que la carga eléctrica de la nube, tanto la negativa como la positiva, puede alcanzar hasta unos centenares de coulombs. Cuando la separación de las cargas eléctricas de la nube es suficiente, se forma un dipolo que da origen a campos eléctricos entre las capas internas de la nube, y también entre la parte inferior de esta y el suelo (ver figura 1).

Además, en la atmósfera existe normalmente un campo eléctrico del orden de 100 a 150 V/m, cuando el terreno es plano y en días de buen clima. Este campo eléctrico se origina en cargas eléctricas positivas que se encuentran a altitudes de hasta 50 kilómetros. El origen de estas cargas eléctricas no se conoce muy bien.

Cuando se forma o se acerca una nube de tormenta, las cargas negativas de la parte inferior de la nube influyen sobre el campo eléctrico exterior, y este comienza a invertirse para luego aumentar intensamente. Al alcanzar una intensidad de unos 10 a 15 kV/m, se puede afirmar que una descarga eléctrica en el suelo es inminente. La inversión y enseguida el intenso aumento del campo eléctrico, preceden a una posible caída de un rayo. Esta descarga puede desplazarse hasta 13 kilómetros, provocar una temperatura de 50.000 °F (unos 28.000 °C), un potencial eléctrico de más de 100 millones de voltios y una intensidad de 20.000 amperes. La velocidad de un rayo puede llegar a los 140.000 km por segundo.

En el punto de entrada a la tierra, el rayo puede destruir, de acuerdo a su potencia y a las características del suelo, un radio de 20 metros.

Los valores numéricos del campo eléctrico señalados suponen un suelo horizontal plano. Los relieves y las asperezas naturales del suelo modifican estos valores. Las leyes de la electrostática nos informan que las asperezas, y en forma particular los vértices, refuerzan localmente el campo eléctrico. Esto se conoce como **efecto punta**.

Este efecto se manifiesta bajo la forma de filamentos luminosos azul-violetáceos que escapan de las puntas y tienen longitudes variables, desde unos pocos centímetros hasta varias decenas, según el tamaño de la aspereza. Este fenómeno era observado por los marineros antiguos en los extremos de los mástiles de los barcos y que denominaban el Fuego de San Telmo. Cuando las asperezas son de tamaño reducido, por ejemplo árboles, mástiles o pararrayos, los efectos están limitados a las proximidades de las puntas. Pero cuando las dimensiones del objeto sobresaliente de la superficie son grandes, los filamentos luminosos se pueden desarrollar mucho más lejos, como por ejemplo, en los postes situados en montes o torres. En estos casos se produce una descarga ascendente que puede alcanzar la nube, y se denomina rayo ascendente. Estos rayos son frecuentes en torres de televisión y en rascacielos. Pero en el suelo plano y en terrenos ondulados, sin ninguna prominencia, el rayo normal es el descendente.

Las nubes de tormenta son enormes masas portadoras de cargas eléctricas positivas y negativas que originan un campo eléctrico a nivel del suelo. Esta distribución de cargas genera a nivel de suelo un campo eléctrico de signo negativo que alcanza a los 15 o 20 kV/m. En la parte inferior se observa un gráfico que muestra la relación entre el campo eléctrico y la distancia.

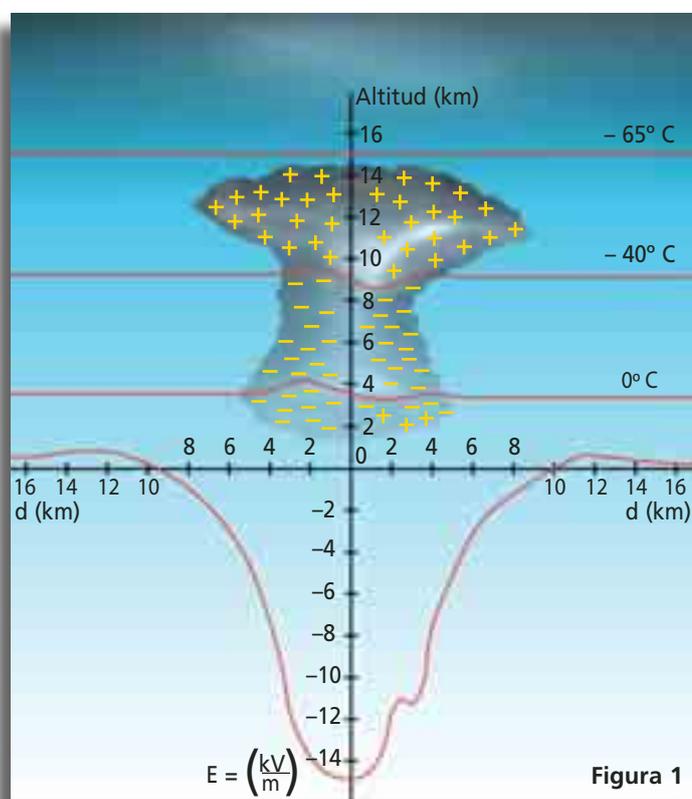


Figura 1

En A se ilustra el campo eléctrico de unos 100 V/m de la atmósfera y las superficies equipotenciales correspondientes. Si existe una diferencia de potencial de 200 V entre nuestra cabeza y los pies, ¿por qué no sufrimos una descarga eléctrica cuando salimos a la calle? En B las superficies equipotenciales se distorsionan debido a la presencia de la persona que está en contacto con el suelo, por lo que la diferencia de potencial es casi nula entre la cabeza y los pies.

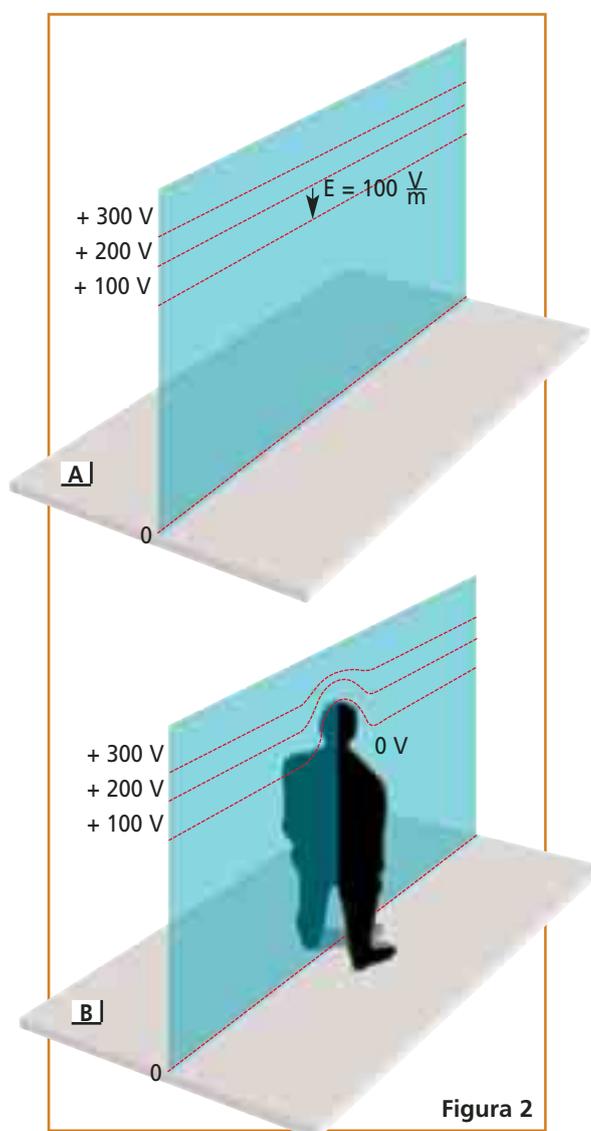


Figura 2

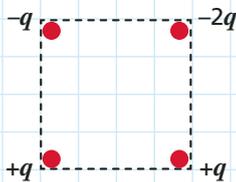
Ejercicios

1 Dos partículas con cargas iguales están separadas 10 cm. Calcula a qué distancia deben colocarse ambas para que la fuerza entre ellas sea:

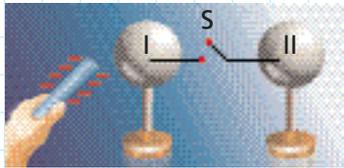
- a. el doble.
- b. cuatro veces mayor.
- c. nueve veces menor.

2 Cuatro partículas cargadas se encuentran en los vértices de un cuadrado de lado a , como se indica en la figura. Si $F = Kq^2/a^2$, el módulo de la fuerza neta sobre la carga $-2q$ es:

- A. $3F$
- B. $2F$
- C. F
- D. $F(2\sqrt{2} - 1)$
- E. $F(2\sqrt{2} + 1)$



3 Dos esferas metálicas aisladas están en contacto entre sí a través de un interruptor S. Se cierra y se acerca una varilla dieléctrica cargada negativamente. Luego S se abre y la varilla se retira.



Después del procedimiento:

- A. Las esferas están descargadas.
- B. Las esferas están cargadas positivamente por inducción.
- C. Las esferas están cargadas negativamente por inducción.
- D. La esfera I está cargada positivamente y la esfera II, negativamente.
- E. La esfera I está cargada negativamente y la esfera II, positivamente.

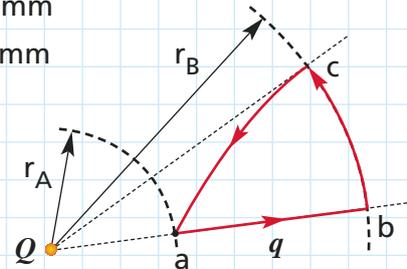
4 ¿Qué diferencia de potencial existe entre dos puntos A y B si el campo eléctrico realiza un trabajo de 100 J para mover una carga de 20 C entre ambos? ¿Cuál de ellos tiene un mayor potencial?

5 La membrana celular de una neurona tiene un espesor de 120×10^{-10} m. El medio interior de la célula se encuentra a un potencial de -36 mV. Calcular el módulo del campo eléctrico aplicado a la membrana.

6 En la figura se muestra una partícula de prueba $q = 5$ nC que se mueve en un camino cerrado, en el campo creado por una partícula $Q = 200$ nC.

- a. ¿Cuál es el trabajo de la fuerza eléctrica en cada uno de sus tramos y el trabajo total?
- b. ¿Cuál es la variación de la energía potencial?

$r_A = 40$ mm
 $r_B = 85$ mm



7 Una gota de aceite, cargada negativamente, tiene un peso de $8,5 \times 10^{-15}$ N. La gota se suspende en el aire cuando se le aplica un campo eléctrico uniforme de $5,3 \times 10^3$ N/C.

- a. ¿Cuánta carga tiene la gota de aceite?
- b. ¿Qué cantidad de electrones tiene en exceso la gota?

8 Dos alambres paralelos distan 12 cm entre sí, y conducen corrientes de igual intensidad. Si la intensidad del campo magnético en el punto medio entre ambos conductores es $3,14 \times 10^{-4}$ T:

- a. ¿Qué intensidad de corriente circula en cada conductor?
- b. ¿Las corrientes circulan en sentido opuesto o igual? ¿Por qué?

La Física en la historia



Otto von Guericke.
Nace el 20 de noviembre de 1602 en Magdeburg, Sajonia Prusiana, hoy Alemania (en la región que hasta hace muy poco se llamaba Alemania Oriental) y muere el 11 de mayo de 1686 en Hamburgo, Alemania.
Ingeniero y filósofo natural que inventó la primera bomba de aire para producir vacío parcial en 1650, estudió el papel del aire en los fenómenos de combustión y respiración.



Primera máquina electrostática.

En el año 1672 el físico alemán Otto von Guericke construyó la primera máquina electrostática, capaz de almacenar electricidad estática por frotamiento y de propinar pequeñas descargas eléctricas.

La electrostática

Las primeras observaciones de los fenómenos eléctricos las realizó Tales de Mileto alrededor del siglo IV antes de Cristo. Él observó que trozos de pasto seco se adherían al ámbar previamente frotado.

Posteriormente, fueron abordados nuevamente y de forma experimental, en el siglo XVII, por el inglés William Gilbert, quien introdujo el término electricidad tomado de la palabra griega electrón. Gilbert estudió además del ámbar, otros materiales que le permitieron establecer que algunos de ellos adquieren una fuerza atractiva cuando son frotados, a diferencia de los metales que no experimentan ningún cambio. Este último hecho fue explicado por otro inglés, Stephen Gray, quien, en 1729, planteó que los metales conducen electricidad, estableciendo, a partir de ese momento, la diferencia entre materiales conductores y aisladores.

En 1733, el francés Charles-François du Fay, quien creía que la electricidad era un fluido, descubrió dos clases de electricidad, una asociada a la fricción del vidrio y otra a la resina, las que denominó electricidad vítrea y resinosa, respectivamente; además, demostró que cuerpos con igual tipo de electricidad se repelen y cuerpos con distinto tipo se atraen. Benjamín Franklin, en el año 1747, postuló que no existían dos tipos de fluidos, sino uno, el que se presentaría en exceso o en déficit en un cuerpo. De esta forma, rebautizó al fluido como “electricidad negativa” si faltaba para el equilibrio, y “electricidad positiva” al exceso. Nombres que perduran hasta hoy, pero con una comprensión distinta del fenómeno, en esto se acercaba más Du Fay a la verdad que Franklin.

La corriente eléctrica fue descubierta a finales del siglo XVIII e investigada por los italianos Luigi Galvani y Alessandro Volta. En 1793, Galvani se encontraba realizando una clase, donde había seccionado y preparado una rana, la que posteriormente fijó sobre un mesón de laboratorio, en el que había una máquina de electrificación. Él observó la contracción del músculo de la rana al ser tocada por un escarpelo, y asoció el fenómeno a la máquina. A partir de esta experiencia, preparó varias ranas y las colgó con ganchos de bronce en su propia reja de hierro, y mientras ocurría una tormenta una de las patas hizo contacto entre la reja y el gancho, produciéndose nuevamente el mismo fenómeno. Galvani creyó erróneamente que el muslo de la rana había almacenado electricidad, la que denominó electricidad animal, y que se descargaba al contacto con ambos metales. Años más tarde, Alessandro G. Volta supuso lo contrario, y propuso que era el contacto entre metales distintos lo que generaba electricidad. Esto lo instó a construir el primer dispositivo químico generador de electricidad, al que denominó batería eléctrica, conocido actualmente como pila, permitiendo obtener por primera vez en la historia una corriente continua.

Posteriormente, el físico danés Hans Christian Oersted, hizo pasar una determinada corriente eléctrica por un alambre y lo acercó a una aguja imantada. La aguja se desvió hacia un lado, apartándose de su posición inicial y hacia el otro cuando la corriente fue dirigida en sentido inverso, demostrando con esto, que una corriente generaba un campo magnético.

El profesor **Hans Christian Oersted**, al término de una clase de Física en la Universidad de Copenhague, comentaba con persuasiva elocuencia a un grupo de sus alumnos, su convicción de que en la naturaleza debía existir alguna relación entre la electricidad y el magnetismo ya que por muchas razones, parecen estar concertados. En este contexto, Christopher Hansteen, discípulo de Oersted, en una carta escrita a Faraday en 1857, relata: "...'repiteamos el experimento nuevamente' decía el profesor, quien colocaba el alambre conductor de la pila en ángulo recto

sobre la aguja magnética, sin notar movimiento. Al término de la clase nos dijo: 'esta vez ubiquemos el alambre conductor paralelo a la aguja'. Hecho esto, quedó perplejo al ver que la aguja se movía. 'Invirtamos la dirección de la corriente' y entonces la aguja se movió en la dirección opuesta. De este modo, fue realizado este gran descubrimiento".

Las partículas cargadas provenientes del Sol provocan espectaculares efectos luminosos en la atmósfera nocturna cerca de los polos (Aurora boreal), al quedar atrapadas por el campo magnético terrestre.

Mediante esta experiencia realizada durante una clase universitaria, quedaba en evidencia una de las relaciones más fundamentales de la Física: la electricidad y el magnetismo no ocurren aislados uno del otro sino a la vez. A partir de ese momento, se daba inicio al electromagnetismo, una de las ramas fundamentales de la Física.

Al estudiar este tema, conocerás las relaciones entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, cómo cuantificarlos y cómo describir los efectos asociados. Los contenidos de este Tema, están organizados de la siguiente forma:

Inducción
electromagnética

Ley de Faraday-Lenz

Corriente continua
y alterna

Circuitos RC, LC, RLC

1. Inducción electromagnética

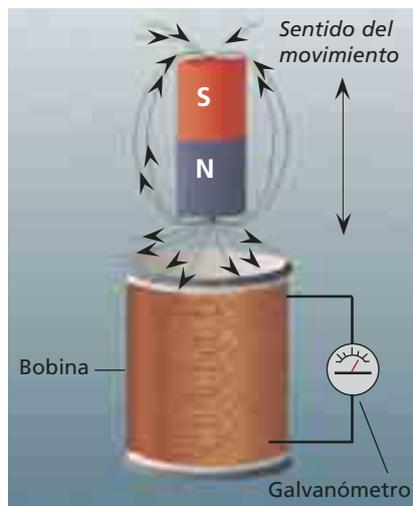
Además de producir fuerzas sobre cargas móviles y sobre conductores por los que circula una corriente, el campo magnético produce otros efectos: mediante un flujo magnético variable en el tiempo, es posible generar una corriente en un conductor.

El experimento de **Oersted** puso de manifiesto que las corrientes eléctricas son capaces de generar campos magnéticos. Sin embargo, para completar la comprensión de las relaciones entre la electricidad y el magnetismo, se realizaron numerosos experimentos para comprobar el proceso inverso: cómo producir una corriente eléctrica a partir de un campo magnético. Estos esfuerzos culminaron con éxito el año 1831 cuando el inglés **Michael Faraday** (1791-1867) y el estadounidense **Joseph Henry** (1797-1878) comprobaron que *un flujo magnético variable en el tiempo era capaz de producir electricidad*.

Experimento de M. Faraday

En 1831, Michael Faraday comprobó que es posible obtener una corriente, al descubrir el fenómeno de **inducción electromagnética**, que consiste en la generación de corriente eléctrica a partir de un **flujo magnético variable**. Este descubrimiento, además de ser fundamental para el desarrollo del electromagnetismo, permitía por primera vez, generar corriente independiente de

reacciones químicas como las producidas por una pila.



Faraday construyó una bobina (carrete de alambre de cobre) y conectó los terminales a un galvanómetro (instrumento que detecta el paso de la corriente eléctrica y cuya aguja, ubicada en el centro, puede girar hacia la izquierda o derecha indicando el sentido de la corriente). En el interior de la bobina, introdujo un imán de barra que hizo entrar o salir. Faraday notó que la aguja del galvanómetro no se movía cuando el imán estaba en reposo en el interior de la bobina; sin embargo, se producía un golpe eléctrico al introducir el imán y otro, en sentido contrario, al sacar el imán. El resultado fue que si el imán se mueve junto a un circuito cerrado, se produce un golpe de corriente, cuya dirección depende del sentido del movimiento del imán.

La interpretación que dio Faraday a este experimento es que la aparición de la corriente se debía a la variación en el número de líneas de campo magnético que se producía al mover el imán.

Además, Faraday comprobó que una corriente que circula por un conductor puede inducir otra corriente en otro conductor. Para esto, él unió los terminales de un conductor a una batería que generaba una corriente. Cerca estaba otro conductor cuyos terminales estaba unidos a un galvanómetro. Observó que en el instante en que cerraba el interruptor, la aguja del galvanómetro se movía en un sentido y retornaba a su posición central mientras el interruptor permanecía cerrado. Al abrir el interruptor, la aguja volvía a moverse pero en sentido contrario, y luego retornaba a la posición central. El resultado fue que una corriente constante no induce otra corriente en el otro conductor (campo magnético creado por la corriente eléctrica constante), pero al cerrar o abrir el interruptor (produciendo un cambio del **flujo** magnético), sí se generaba una corriente en el otro conductor.



M. Faraday, hijo de un herrero, tuvo una educación rudimentaria antes de trabajar como aprendiz de librero, lo que le permitió leer libros de química y electricidad que despertaron su interés por la ciencia. En 1813 escribió a Humphrey Daby, unos de los químicos más importantes de su época, quien impresionado por las notas que le envió, le ofreció a Faraday trabajo en su laboratorio. En 1825 es nombrado director del laboratorio de la Royal Institution. Se le reconoce como uno de los mayores científicos del siglo XIX.

1.1 Flujo magnético

El concepto de flujo lo introdujo **Karl Friedrich Gauss** y fue aplicado por Faraday para estudiar el electromagnetismo, explicando con ello los fenómenos de inducción a partir de los cambios que experimentaban las líneas de campo magnético. De esta manera, **el flujo magnético (ϕ_m) corresponde al número de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie arbitraria** (como la cantidad de gotas de lluvia que intercepta un paraguas plano en distintas orientaciones). Se designa con la letra griega ϕ_m y se expresa de la siguiente forma:

$$\phi_m = B A \cos \theta$$

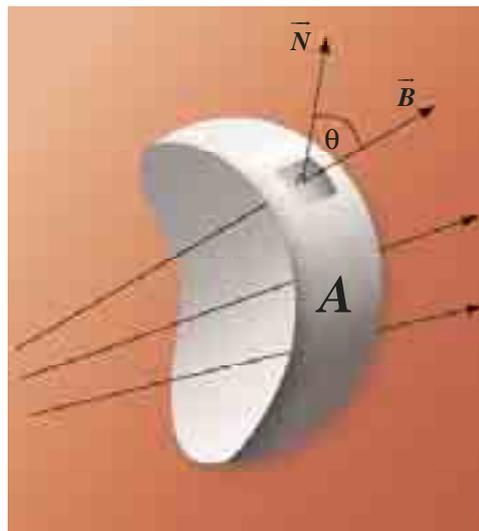
en que A es el área de la superficie, B es el campo magnético uniforme donde la superficie se encuentra inmersa, θ es el ángulo formado por el vector de campo con el vector normal a la superficie (\vec{N}). En el SI, la unidad de medida para el flujo magnético es el weber (Wb), en honor al físico alemán **Wilhelm Weber** (1804-1891), y corresponde a:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$$

PARA CALCULAR

Una espira circular de 0,5 m de diámetro puede rotar al interior de un campo magnético uniforme de $2,5 \times 10^{-4} \text{ T}$ en la dirección del eje X.

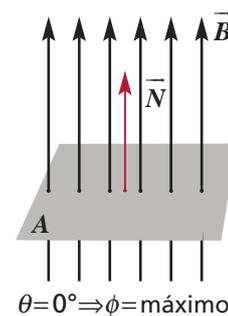
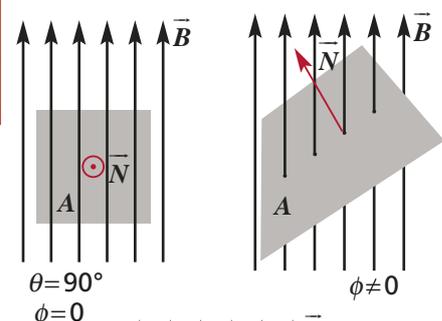
- a) ¿Cuál es el valor del flujo magnético al interior de la espira cuando su normal forma un ángulo de 30° respecto al mismo eje?
- b) ¿Cuál es el valor del ángulo que forma la espira respecto al eje x cuando el flujo magnético es de $-4,0 \times 10^{-5} \text{ Wb}$?



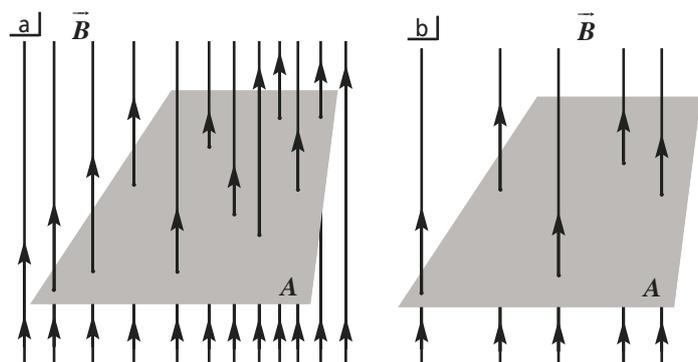
El flujo magnético es producido por la proyección del campo magnético B sobre la perpendicular N al área A .

Si las líneas de campo magnético son paralelas a la superficie (y perpendiculares a \vec{N}), entonces el flujo es nulo. El valor del flujo aumenta a medida que el ángulo θ decrece, alcanzando su máximo valor cuando el campo es perpendicular a la superficie. Observa las ilustraciones del costado de la página.

Es importante recordar que, como no existen polos magnéticos aislados (monopolos), las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas. Por tanto, en una **superficie cerrada** en un campo magnético (a diferencia de las líneas de campo eléctrico en una carga), el flujo magnético que entra es igual al que sale ya que el mismo número de líneas que entra debe salir.



El flujo magnético a través de una superficie depende de su inclinación con respecto al vector B .



El flujo magnético en (a) es mayor que el flujo en (b).

1.2 Ley de Faraday

En las experiencias de Faraday y, paralelamente, en las de Henry, se prueba que si el flujo magnético cambia bruscamente (por ejemplo, al mover el imán rápidamente), la intensidad de corriente inducida aumenta. Para cuantificar lo anterior, Faraday propuso una expresión llamada **ley de inducción** o **ley de Faraday**, que sostiene que la f.e.m. (fuerza electromotriz) inducida (\mathcal{E}) es proporcional a la rapidez de cambio del flujo magnético ($\Delta\phi / \Delta t$) que atraviesa un circuito :

$$\mathcal{E} \sim \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

En el SI, la f.e.m. inducida se expresa en volt. Por tanto:

$$1\text{V} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{s}}$$

Si tenemos una bobina de N espiras, la ley de Faraday resulta:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

El signo menos, se explica por la ley de Lenz que veremos más adelante. Es importante notar que esta ley es experimental y no se puede demostrar matemáticamente.

Además, mientras mayor sea el cambio del flujo, mayor será el valor de la corriente eléctrica que se inducirá en el alambre conductor.

Debido a que Faraday no tuvo una preparación matemática adecuada, pues no accedió a la educación superior, no pudo desarrollar la teoría matemática del campo electromagnético, hecho que tuvo que esperar

hasta Maxwell. Sin embargo, tuvo el genio extraordinario para describir esta idea de manera gráfica.



La guitarra eléctrica funciona según la ley de Faraday. La cuerda al vibrar induce una f.e.m. en una bobina.

ACTIVIDAD 10: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Materiales necesarios: 1 m de cable conductor para timbre, un imán potente (de parlante, por ejemplo) y una brújula.

1. Identifica los polos del imán con la ayuda de la brújula.
2. Enrolla el cable como se ve en la figura de modo que en el centro se pueda introducir el imán.
3. Une los extremos del cable entre sí de modo que el extremo E quede mas largo que la brújula.
4. Alinea el extremo E del cable sobre la brújula y paralelo a ella.
5. Coloca el imán en el interior del enrollamiento y luego retíralo rápidamente y observa al mismo tiempo la brújula.
6. Repite el paso anterior pero invirtiendo sus polos.

7. Introduce ahora el imán rápidamente y repite después invirtiendo sus polos.
8. Acerca y retira rápidamente el enrollamiento al imán en reposo.
 - ¿Detecta la aguja de la brújula una corriente cuando el imán está en reposo respecto del enrollamiento?
 - ¿Detecta la aguja de la brújula una corriente cuando el imán o el enrollamiento se mueven?



EN LA WEB WWW

Si quieres aprender más acerca de la ley de Faraday, visita las siguientes direcciones de Internet: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw.html
www.lightlink.com/sergey/java/java/indcur/index.html
Recuerda que las direcciones o su contenido pueden cambiar.

1.3 Sentido de la corriente inducida

En el año 1834, el físico ruso **Heinrich Friedrich Lenz** logró formular una ley que permite predecir el sentido de la corriente inducida en una espira conductora cuando se produce una variación de flujo magnético externo a ella. **La ley de Lenz** está fundada en el principio de conservación de la energía y sostiene que: **la f.e.m. inducida produce una corriente cuyo sentido es tal que el campo magnético que genera se opone a la variación del flujo magnético que la provoca.** Es importante notar que en esta ley de carácter cualitativo, se mencionan dos campos magnéticos: el externo que varía en el tiempo e induce una f.e.m. y el interno que genera una corriente en el conductor.

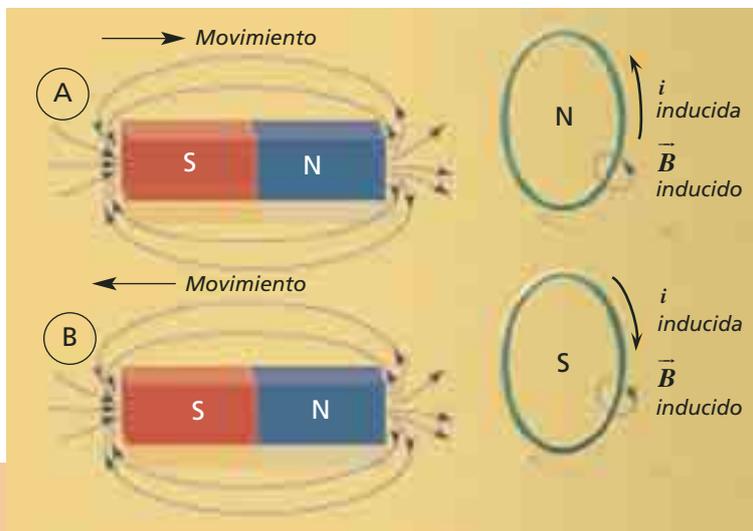
Supongamos que primero acercamos el polo norte de un imán a una espira conductora. La corriente generada en la cara de la espira por la cual entra el imán (el sentido se puede obtener con la regla de la mano derecha) induce un campo magnético con polo norte que repele al imán (A). Si luego alejamos el imán, el sentido de la corriente inducida en la espira se invierte y ahora el polo sur de la espira queda enfrentado al polo norte del imán, atrayéndolo (B). Por tanto, el campo producido por la

corriente inducida tiende a impedir que el flujo a través del circuito aumente o disminuya.

Las leyes de Faraday y Lenz, que definen respectivamente el valor de la f.e.m. inducida en un circuito y el sentido de la corriente inducida, pueden ser unificadas en una sola ley de la siguiente manera:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

donde el signo menos indica la oposición de la f.e.m. inducida a la causa que la genera.



Ejercicio resuelto 5

Una bobina de 100 espiras, que tiene un área transversal de $0,05 \text{ m}^2$, está en presencia de un campo magnético perpendicular al plano de la bobina que varía linealmente desde 0 a $0,4 \text{ T}$ en $0,5 \text{ s}$. ¿Cuál es la f.e.m. inducida en la bobina?

El cambio de intensidad del campo ocurre de manera lineal, de modo que la variación del flujo se calculará como:

$$\Delta\phi = \phi_f - \phi_i$$

$$\phi_f = B_f A = 0,4 \text{ T} \cdot 0,05 \text{ m}^2 = 0,02 \text{ Wb}$$

$$\phi_i = B_i A = 0 \text{ T} \cdot 0,05 \text{ m}^2 = 0 \text{ Wb}$$

Luego, la rapidez de cambio del flujo magnético será:

$$\mathcal{E} = \frac{-\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{-0,02 \text{ Wb}}{0,5 \text{ s}} = -0,04 \text{ V}$$

Por lo tanto, la f.e.m. inducida en la bobina de 100 espiras será de $100\mathcal{E} = -4 \text{ V}$

1.4 Inducción electromagnética en un conductor móvil

La ley de inducción implica la existencia de una f.e.m. cuando el flujo de campo magnético cambia en el tiempo a través del conductor. Es importante determinar si ocurre lo mismo cuando la variación del flujo se debe al movimiento o cambio de la longitud del conductor sin que varíe el campo magnético.

Una barra conductora de longitud l y resistencia R se mueve hacia la derecha con velocidad constante \vec{v} , sobre dos rieles conductores fijos de resistencia despreciable. Esto ocurre en presencia de un campo magnético externo \vec{B} uniforme y perpendicular al plano, tal como se muestra en la figura A.

Si x es la longitud horizontal variable, tenemos que, en un instante dado, el flujo magnético a través de la espira es:

$$\phi = B l x$$

Debido al movimiento de la barra, se produce un flujo magnético variable en la espira ($N = 1$), generándose una f.e.m. inducida, cuyo módulo, de acuerdo a la ley de Faraday, será:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = Bl \frac{x}{\Delta t} = Blv$$

resultando una expresión que permite obtener la f.e.m. en el caso de un conductor móvil.

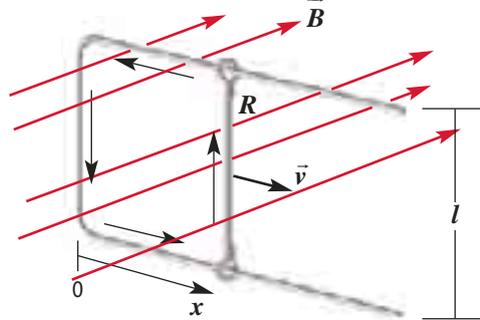


figura A

Supongamos que tenemos una bobina (con $N = 1$ para el análisis) que gira en un campo magnético constante. Cuando la espira rota hay un cambio en el número de líneas de campo que pasan por ella –según se muestra en la figura B– y por tanto, según la relación $\phi = BA \cos\theta$ –donde el ángulo θ y el área expuesta cambian–, se produce una variación del flujo magnético a través de la superficie generando una corriente inducida alterna. La rotación de un circuito en un campo magnético es uno de los métodos para producir una f.e.m. alterna, como veremos más adelante.

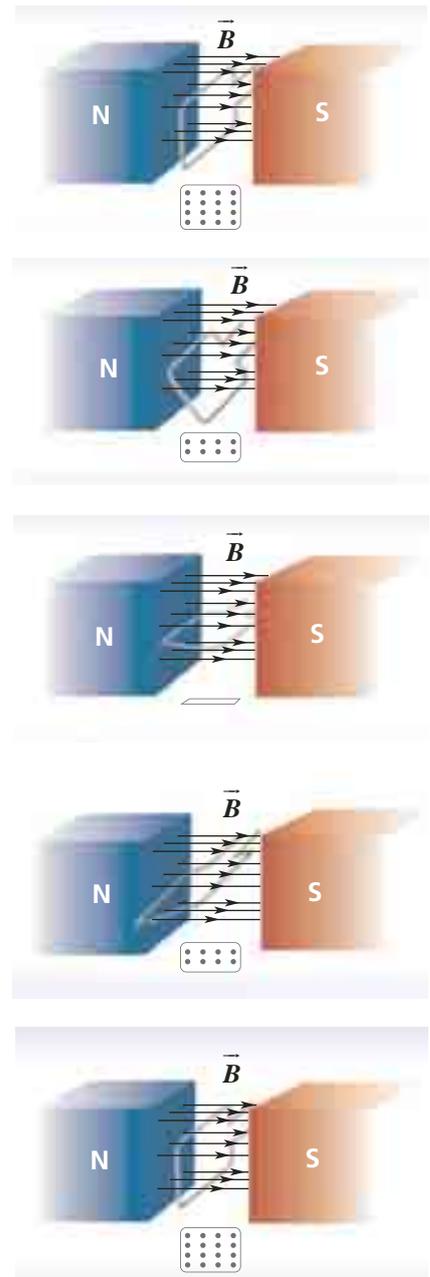


figura B

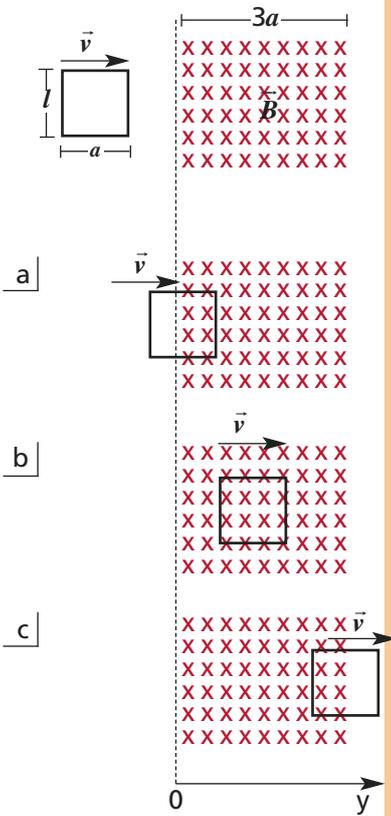
Al girar la espira cambia el número de líneas de campo que encierra. Dicho número pasa de un máximo a un mínimo y de nuevo a un máximo. Bajo cada figura, se ve el área efectiva de la espira para cada ángulo.

PARA CALCULAR

- Un campo magnético constante, de 0,5 T, atraviesa perpendicularmente una espira móvil con una barra conductora de 0,5 m de longitud.
 - Calcula el valor de la f.e.m. inducida si la barra se mueve con una velocidad de 0,1 m/s.
 - ¿Cuál es la resistencia de la barra si se genera una corriente de 0,1 A?
- Una bobina de sección circular de 196 espiras experimenta una variación de flujo magnético de $130 \text{ Tm}^2/\text{s}$. ¿Cuál es la f.e.m. inducida en ella?

Ejercicio resuelto 6

Una espira rectangular de largo l y ancho a se mueve con velocidad constante v hacia la derecha, ingresando a una región de extensión $3a$ donde existe un campo magnético uniforme B que entra al plano, tal como se muestra en la figura.



a) ¿Cómo varía el flujo magnético ϕ a través de la espira en función de su posición y ?

- A medida que la espira ingresa al campo magnético (a), el flujo magnético es creciente.
- Mientras la espira permanece en el interior del campo (b), el flujo es constante.
- A medida que la espira sale del campo (c), el flujo es decreciente.
- El flujo es nulo cuando la espira se mueve fuera del campo.

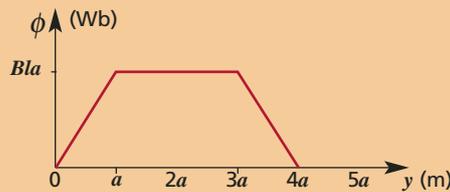
Si calculamos el flujo magnético como $\phi = B A$:

En (a), cuando y está entre 0 y a , el área a considerar es $A = l y$ y $\phi = B l y$.

En (b), el área a considerar es $A = l a$ y $\phi = B l a$.

En (c), cuando y está entre $3a$ y $4a$, el área a considerar es $A = l (4a - y)$ y $\phi = B l (4a - y)$.

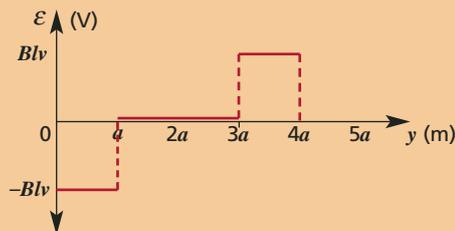
Entonces, el gráfico flujo magnético en función de la posición es:



b) ¿Cómo varía la f.e.m. inducida en la espira en función de su posición y ?

- Cuando la espira se encuentra completamente fuera del campo magnético, en su interior no hay f.e.m. inducida.
- A medida que la espira ingresa al campo, el flujo aumenta y, de acuerdo a la ley de Lenz, la corriente inducida recorrerá la espira en sentido antihorario. En este caso, la f.e.m. inducida es $- B l v$.
- A medida que la espira abandona el campo, se produce una disminución del flujo y, de acuerdo a la ley de Lenz, la corriente inducida recorrerá la espira en sentido contrario, siendo ahora el valor de la f.e.m. inducida $+ B l v$.

De esta forma, el gráfico f.e.m. en función de la posición es:



1.5 Inductancia o autoinductancia

Según las leyes de inducción de Faraday y Lenz, una corriente variable en un conductor induce en él una f.e.m. que se opone a la f.e.m. que la produjo, fenómeno denominado **autoinducción** o simplemente **inducción**.

La f.e.m. autoinducida es directamente proporcional a la rapidez con que cambia la corriente. La constante de proporcionalidad es conocida como **inductancia** o autoinductancia de una bobina y se simboliza con la letra (L). La expresión que permite calcular la f.e.m. inducida es:

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

En el SI, la inductancia se expresa en volt x segundo/ampere, unidad llamada **henry (H)** en memoria del físico norteamericano **Joseph Henry**. El signo menos indica que la

f.e.m. se opone al cambio de corriente. Así, si la corriente aumenta, $\Delta i/\Delta t$ es positivo y \mathcal{E} se opone a la corriente, y si la corriente disminuye, $\Delta i/\Delta t$ es negativo y \mathcal{E} actúa en la misma dirección que la corriente (se opone a la disminución de la corriente).



Los fenómenos de autoinducción provocan chispazos (ionización de las moléculas del aire circundante) en los interruptores durante la desconexión debido a la aparición de una diferencia de potencial entre los bornes del interruptor.

Cuando dos circuitos eléctricos por los que fluye una corriente variable se sitúan muy próximos entre sí, cada uno induce en el otro una f.e.m. que, según la ley de Lenz, tiende a oponerse a la f.e.m. que produce la corriente original del circuito. Este fenómeno se conoce como **inducción mutua**.

NOTA

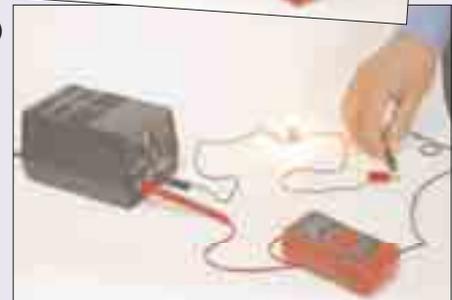
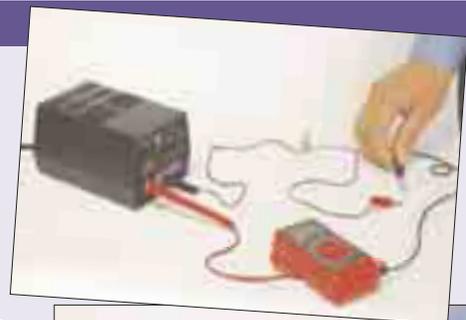
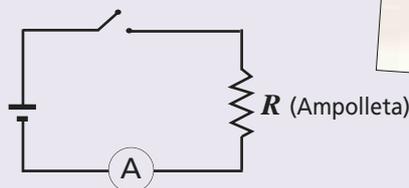
Debido al fenómeno de autoinductancia producido en una bobina, una batería debe realizar un trabajo contra ella para crear una corriente. Parte de esta energía puede almacenarse en el campo magnético de la bobina. Así, la energía almacenada por una bobina de inductancia L que conduce una corriente i se calcula como:

$$U = \frac{1}{2} L i^2$$

ACTIVIDAD 11: AUTOINDUCCIÓN

Organicen un grupo de trabajo de 3 personas y reúnan los siguientes materiales: una ampolleta de linterna, una pila o batería, cables conductores, un interruptor y un multítester.

1. Armen el circuito como se ve en la figura.
2. Pongan el multítester en la modalidad de amperímetro (A). ¿Cuál es su lectura antes de presionar el interruptor?
3. Presionen el interruptor y midan nuevamente la intensidad de corriente. ¿El cambio de valor ocurre instantáneamente?
4. Formulen alguna hipótesis que permita explicar lo observado.



1.6 Transformadores

Una de las aplicaciones más utilizadas de las leyes de Faraday y Lenz es en los **transformadores**, cuya función principal es subir o bajar la diferencia de potencial eléctrico o voltaje alternos entregada por un sistema de generación. Todos los televisores, computadores y muchos de los equipos personales de audio utilizan transformadores para funcionar. Un transformador está compuesto por una bobina primaria y otra secundaria con distinto número N de espiras unidas mediante un núcleo de hierro laminado (disminuye las corrientes inducidas o parásitas que causan el calentamiento) para concentrar el flujo magnético.

Si tenemos un transformador ideal de potencia P con N_1 espiras en la bobina primaria y N_2 espiras en la bobina secundaria, conectado a un voltaje variable de entrada V_1 ,

la intensidad de corriente en el primario está dada por:

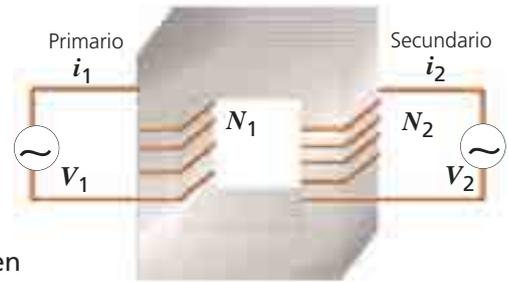
$$i_1 = \frac{P}{V_1}$$

En un transformador, la **rapidez de cambio del flujo magnético** $\Delta\phi/\Delta t$ es la misma en el primario y en el secundario. Cuando la bobina primaria es conectada a una fuente alterna, el cambio de flujo magnético es transmitido a la bobina secundaria a través del núcleo de hierro. Al aplicar la ley de Faraday –Lenz a ambos circuitos se obtiene:

$$V_1 = -N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad V_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

De donde se deduce que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Para aumentar el voltaje de salida, se debe aumentar el número de espiras en el secundario respecto del primario. Para disminuir el voltaje de salida, se debe disminuir el número de espiras del secundario.

En un **transformador ideal** (no hay pérdida de flujo) se conserva la energía, por lo que la potencia en el primario es igual a la del secundario:

$$V_1 i_1 = V_2 i_2$$

En consecuencia, cuando un transformador eleva el voltaje, se reduce la corriente, y viceversa. Cuando el voltaje en el secundario es menor que en el primario, se dice que el transformador es de baja. En caso contrario, el transformador es de alta.

PARA CALCULAR

1. Una ampolleta de 6 V y 12 W se encuentra conectada a la salida de un transformador ideal de 8.000 espiras en su bobina primaria. Si la entrada del transformador se encuentra conectada a una fuente de 240 V:
 - a) ¿Qué tipo de fuente es la que se ha conectado a la entrada del transformador?
 - b) ¿Cuántas espiras debe tener la bobina del secundario?
 - c) ¿Cuál será la lectura de un amperímetro conectado al primario?

1. Un transformador tiene 300 espiras en su bobina primaria y 90.000 en la bobina secundaria. Si el primario se conecta a un generador de 60 V:
 - a) ¿Cuál es la f.e.m. en el secundario?
 - b) Si por el secundario pasa una corriente de 0,5 A, ¿qué corriente habrá en el primario? ¿Cuál es la potencia en el primario y en el secundario?



Los transformadores ubicados en el tendido eléctrico reducen o aumentan el voltaje de acuerdo a las necesidades de utilización.

2. Corriente continua y alterna

En la vida cotidiana, la mayoría de las fuentes de electricidad que alimentan las máquinas industriales, los electrodomésticos o los equipos informáticos, entregan corriente alterna. El aprovechamiento de este tipo de corrientes requiere usar dispositivos adecuados provistos de tres componentes esenciales que se pueden asociar: resistencias eléctricas (resistores), condensadores y elementos de autoinducción (inductores).

Tal vez, el hito que dio inicio al rápido progreso de la electricidad fue la invención de la pila eléctrica, realizada por Volta, que generaba una corriente eléctrica continua entre dos placas metálicas (una de cinc y la otra de cobre) sumergidas en ácido sulfúrico. La importancia de esta pila fue que por primera vez se disponía de una fuente constante de electricidad.

Posteriormente, las experiencias de Oersted, Faraday, Henry y Lenz mostraron la posibilidad de convertir energía mecánica (movimiento) en corriente eléctrica, lo que permitió sacar la electricidad del laboratorio a través de la implementación de generadores.

A diferencia de la pila de Volta, que producía corriente continua, el generador producía corriente alterna que puede ser trasladada a grandes distancias, ya que se pueden conseguir voltajes elevados y corrientes pequeñas que disipan poca

energía eléctrica. De esta forma, fue posible llevar la corriente eléctrica desde las plantas generadoras a las ciudades y pueblos.

Muchos de los artefactos que usamos diariamente funcionan con corriente continua (televisores, computadoras, radios, etc.) por lo que es necesario rectificar la corriente alterna (de 50 Hz) que entrega la empresa generadora. Esto se hace generalmente de manera interna en los aparatos mediante un sistema que permite transformar corriente alterna en corriente continua. Otros aparatos más simples como calentadores y ampollas funcionan directamente con corriente alterna.

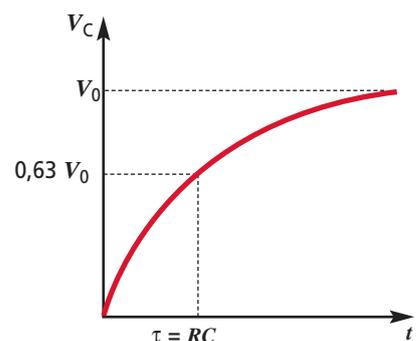
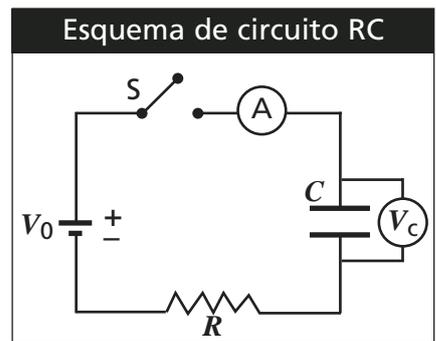
2.1 Circuitos de corriente continua (c.c.)

Los circuitos de corriente continua son alimentados con baterías que entregan una f.e.m. constante. En un circuito formado solo por resistores en serie (recuerda que los cables y la fuente de poder también tienen resistencia), la intensidad de corriente en un elemento no varía y el voltaje es directamente proporcional a la intensidad de corriente. Si el circuito está formado además por condensadores e inductores, la intensidad de corriente cambia en el tiempo.

Circuito RC

Es un circuito eléctrico de corriente continua formado por un resistor de resistencia R , que limita el paso de la corriente, y

un condensador de capacidad C , inicialmente descargado, al que se han conectado un amperímetro y un voltímetro. Al cerrar el interruptor, el condensador se carga. Más adelante se analizará la etapa de carga y descarga de un condensador, en un circuito RC.



El gráfico muestra el voltaje en el condensador durante la carga. El producto $RC = \tau$ se denomina constante de tiempo del circuito y representa el tiempo en que la carga del condensador alcanza un 63% de su máximo posible. Si τ es pequeño, la carga alcanza el valor máximo con mucha rapidez, pero si τ es grande, puede pasar mucho tiempo antes de que el condensador se cargue completamente.

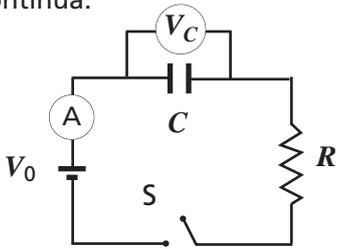
PARA CALCULAR

Un capacitor de $3\mu\text{F}$ inicialmente descargado se conecta en serie a un resistor de $6 \times 10^5 \Omega$ y a una batería de 12 V . Determina la constante de tiempo (τ) del circuito.

Carga y descarga de un condensador

Carga del condensador

Para cargar el condensador necesitamos aplicar a sus placas un voltaje continuo entregado por una fuente de f.e.m. continua.



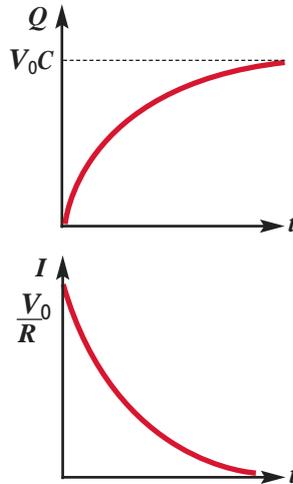
Al cerrar el interruptor S, el amperímetro marcará una intensidad de corriente inicial V_0/R . A medida que se produce el proceso de carga del condensador, la corriente (I) disminuye y el voltaje (V) en el condensador aumenta proporcionalmente a su carga. Este es el denominado régimen transiente de la corriente y en él, las curvas que caracterizan el proceso de carga del condensador en función del tiempo están dadas por las ecuaciones:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/RC}$$

$$V_C(t) = V_0(1 - e^{-t/RC})$$

$$Q(t) = V_0 C(1 - e^{-t/RC})$$

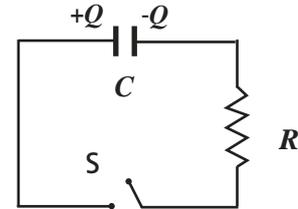
A $t = 0$, la corriente es V_0/R , pero disminuye con el tiempo hasta que finalmente se hace cero, cuando la diferencia de potencial a través del condensador es igual a la de la f.e.m. aplicada.



Variación de la carga y la corriente durante la carga de un condensador. El gráfico de $Q(t)$ es similar al gráfico $V(t)$, (página 49).

Descarga del condensador

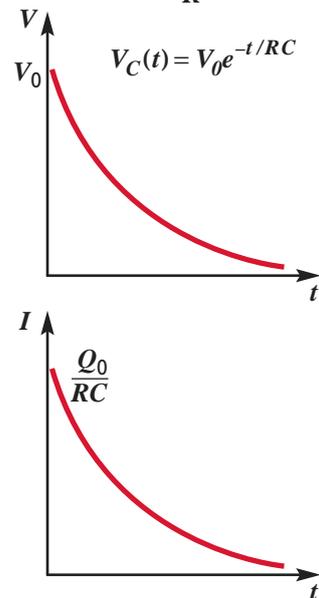
Supongamos que el condensador está inicialmente cargado con una carga Q . Cuando el interruptor S se encuentra desconectado, el voltaje en el condensador es Q/C y no hay corriente en el circuito.



Al conectar el interruptor, el condensador se descarga a través del resistor. Durante este proceso, la corriente aumenta y el voltaje del condensador disminuye proporcionalmente a su carga. Durante el régimen transiente, las curvas que caracterizan el proceso de la descarga de un condensador en función del tiempo están dadas por las ecuaciones:

$$I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/RC}$$

$$V_C(t) = V_0 e^{-t/RC}$$



Variación de la carga y el módulo de la corriente durante la descarga de un condensador.

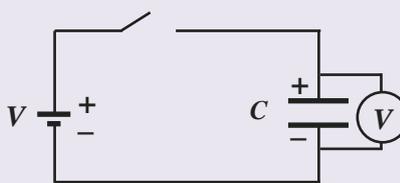
ACTIVIDAD 12: DESCARGA DE UN CONDENSADOR (CIRCUITO RC)

En grupo de dos, reúnan los siguientes materiales: un condensador de $2.200 \mu\text{F}$, un voltímetro, un cronómetro, cables, una fuente de 9 o 12 V, papel milimetrado y semilog.

1. Armen el circuito de la figura donde la resistencia R corresponde a la del voltímetro.
2. Cierren el circuito para que se cargue el condensador y registren el valor del voltaje.
3. Abran el circuito y a medida que el voltaje disminuye, registren

los voltajes con sus respectivos tiempos. Si se mantiene el voltaje para valores pequeños, definan cuándo terminar el registro.

4. Elaboren un gráfico $V(t)$ en papel milimetrado, y en el semilog un gráfico $\log V(t)$ para obtener τ con el cálculo de la pendiente.

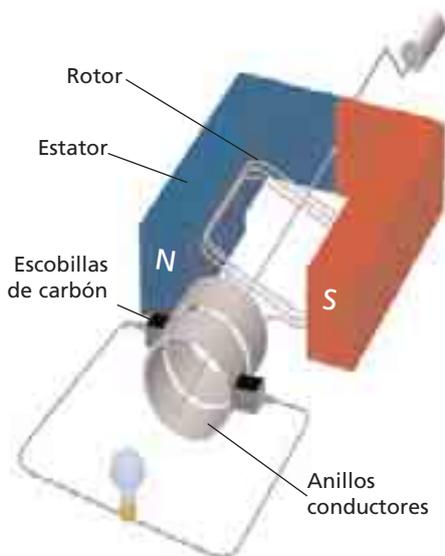


2.2 Circuitos de corriente alterna (a.c.)

Los generadores de corriente continua se llaman **dinamos**. Los de corriente alterna se llaman **alternadores**, estos entregan una f.e.m. cuya polaridad se va alternando regularmente en el tiempo. En ambos casos se transforma la energía mecánica en eléctrica, al contrario de los motores eléctricos.

El alternador

Los generadores de corriente alterna o alternadores están compuestos básicamente por una bobina que gira (**rotor**) en presencia de un campo magnético fijo y uniforme (**estator**), debido a la acción de un agente externo. Los terminales de la bobina se encuentran unidos a sendos **anillos conductores** en contacto con dos cepillos o **escobillas de carbón**.



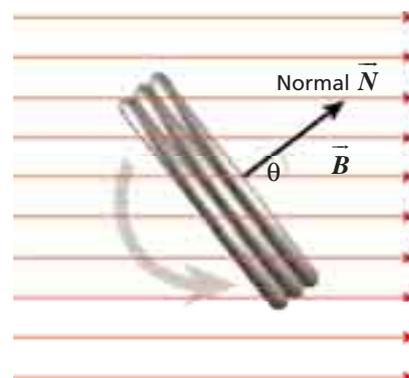
El funcionamiento del generador a.c. se basa en la inducción electromagnética definida por Faraday. Al hacer rotar con una velocidad angular constante una bobina de N espiras, con áreas A iguales, en presencia de un campo magnético \vec{B} perpendicular al eje de giro, se produce una variación del flujo magnético que induce una f.e.m. en el rotor.

Recordando que en el movimiento circular uniforme se cumple que $\theta = \omega t = 2\pi f t$, entonces, según la ley de Faraday, la f.e.m. inducida V en la bobina será:

$$V = V_0 \text{sen}(2\pi f t)$$

$$\text{con } V_0 = 2\pi f NBA$$

Esta relación indica que la f.e.m. inducida varía sinusoidalmente a medida que transcurre el tiempo, tomando alternadamente valores positivos y negativos. Su máximo valor V_0 es $2\pi f NBA$ y se obtiene cuando la normal al plano de la bobina es perpendicular al vector de campo magnético creado por el estator.



θ representa el ángulo formado por el vector de campo magnético y la normal a la superficie de las espiras, en un instante de tiempo (t).

PARA CALCULAR

1. Describe tres formas en que se puede aumentar el voltaje máximo producido por un generador alterno.
2. ¿Cuántas veces deja de pasar corriente por una ampolla de 220 V a.c. durante una hora de funcionamiento?
3. Un generador a.c. tiene un rotor de 1.000 espiras con $0,025 \text{ m}^2$ de área, una frecuencia de 40 Hz y un estator de $3 \times 10^{-4} \text{ T}$. ¿Cuál será su voltaje r.m.s.?

DATO

A pesar de que el valor del voltaje cambia, cuando se habla del voltaje de un lugar se usa una sola cifra. Por ejemplo, se dice que en Chile el voltaje es de 220 V. El valor dado para el voltaje es estadístico y se llama voltaje r.m.s. ($V_{\text{r.m.s}}$) o eficaz, y se calcula como:

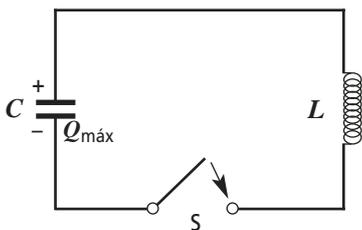
$$V_0 / \sqrt{2}$$

(V_0 es el máximo valor de la f.e.m. inducida).

Circuitos LC

El modelo más simple de un circuito de corriente alterna es aquel que se obtiene al conectar un condensador de capacidad C , con una carga inicial Q_0 , y una bobina de inductancia L . Estos circuitos se denominan **circuitos oscilantes** o simplemente **LC**, ya que: suponiendo despreciable la resistencia del circuito, la corriente (I) y el voltaje (V) comenzarán a oscilar indefinidamente de modo que cuando I es máximo, V es mínimo, y viceversa. Esta oscilación tiene una frecuencia dada por:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ con } \omega = 2\pi f$$



En un circuito en serie formado por un condensador cargado y una bobina, la corriente y el voltaje oscilan al cerrar el interruptor.

En este circuito **LC**, la corriente y el voltaje presentan un comportamiento alterno. Los valores de la corriente y el voltaje varían sinusoidalmente a medida que transcurre el

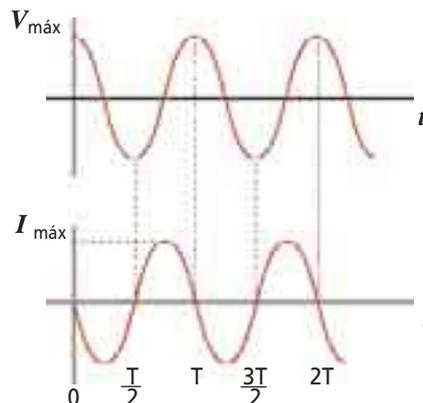
tiempo. Si la carga inicial del condensador es Q_0 y su capacidad C , entonces la variación de su voltaje en el tiempo es de la forma:

$$V_C(t) = V_0 \cos(\omega t) \text{ con } V_0 = \frac{Q_0}{C}$$

Y la variación de corriente es de la forma:

$$I(t) = -I_0 \sin(\omega t) \text{ con } I_0 = \omega Q_0$$

Debido a las oscilaciones producidas en estos circuitos, la energía llamada electromagnética total se conserva transfiriéndose sucesivamente desde el campo eléctrico del condensador al campo magnético de la bobina.



Cuando el voltaje es nulo, la corriente es máxima. Tal como sucede con las funciones seno y coseno, la corriente y el voltaje se encuentran desfasados en 90° .

En un condensador de capacitancia C , la energía almacenada se calcula como:

$$U_C = \frac{CV^2}{2}$$

mientras que en una bobina de inductancia L , dicha energía es:

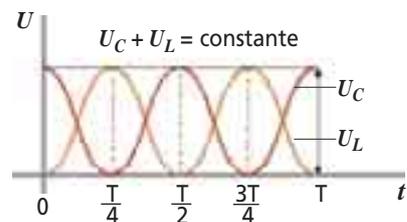
$$U_L = \frac{LI^2}{2}$$

de modo que la energía total (U) puede calcularse en cualquier instante como:

$$U = \frac{CV^2}{2} + \frac{LI^2}{2}$$

Remplazando las expresiones alternas del voltaje y de la corriente, tenemos la siguiente expresión:

$$U = \frac{CV_0^2}{2} \cos^2(\omega t) + \frac{LI_0^2}{2} \sin^2(\omega t)$$

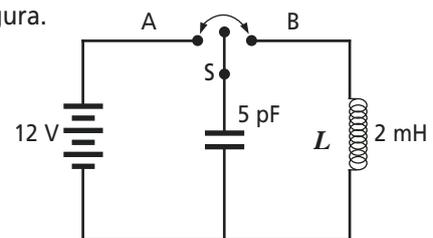


Tal como sucede con la corriente y el voltaje, la energía almacenada en el condensador y en la bobina varían sinusoidalmente. Sin embargo, su suma es constante en cualquier instante del proceso. T es el período.

PARA CALCULAR

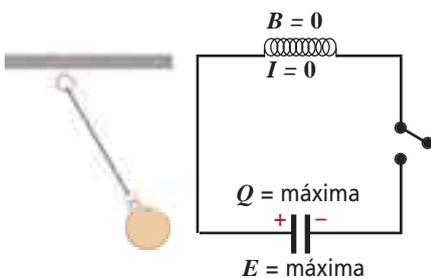
Un circuito **LC** está formado por un capacitor de 5 pF y un inductor de 2 mH conectados en paralelo a una batería de 12 V , tal como se muestra en la figura. Inicialmente, el interruptor S se mueve a la posición **A**, cargándose el condensador. Después, S se mueve a la posición **B**.

- a) ¿Cuál es la carga máxima del condensador?
- b) ¿Cuál es la frecuencia de oscilación del circuito?
- c) ¿Cuál es la intensidad de corriente máxima en el circuito?
- d) ¿Cuál es la energía total almacenada en el circuito?



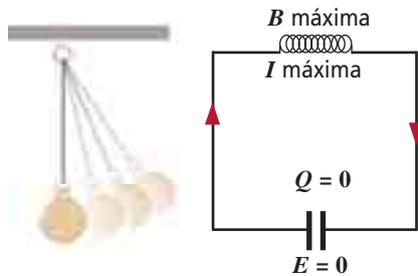
A continuación, vamos a hacer una analogía entre las oscilaciones de un péndulo simple y un circuito LC . Esto nos permitirá analizar desde el punto de vista energético las transferencias de energía que ocurren en ambos sistemas. Algo similar ocurre en un sistema masa-resorte. Cuando no existe una f.e.m. la energía del circuito se origina de la energía que inicialmente estaba almacenada en uno o dos componentes del circuito. Vamos a suponer que el condensador está cargado por alguna fuente externa que no interesa para nuestro análisis.

Justo antes de cerrar el interruptor no hay corriente en el circuito y toda la energía está almacenada en el campo eléctrico del condensador y es igual a $Q_0^2/2C$. Esto equivale a la situación del péndulo justo antes de ser soltado: toda la energía es potencial y está almacenada en la masa del péndulo.

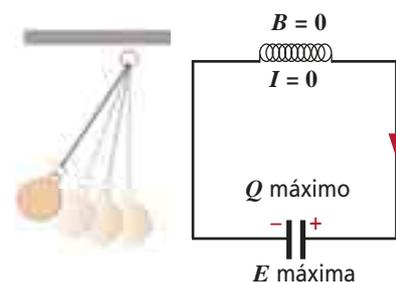


Al cerrar el interruptor comienza a aumentar la corriente a medida que el condensador se descarga a través de la bobina. La energía se transfiere gradualmente desde el campo eléctrico del condensador al campo magnético del inductor. Cuando el condensador se descarga

completamente, la corriente en el circuito alcanza su máximo valor y toda la energía es $U_L = LI^2/2$. Esto es similar a lo que sucede con la masa del péndulo al pasar por el punto más bajo de su trayectoria: toda su energía es cinética.

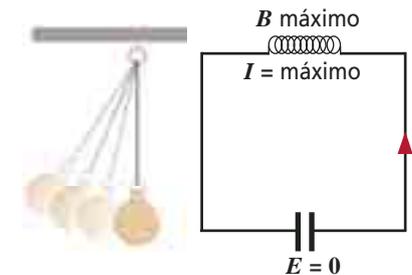


A medida que el condensador comienza a cargarse, la corriente en el circuito comienza a disminuir y la energía se transfiere ahora desde el campo magnético del inductor acumulándose paulatinamente en el campo eléctrico del condensador. Cuando el condensador se carga completamente, la corriente en el circuito nuevamente es nula. En el caso del péndulo, equivale a la situación luego de medio ciclo: toda la energía nuevamente es potencial.

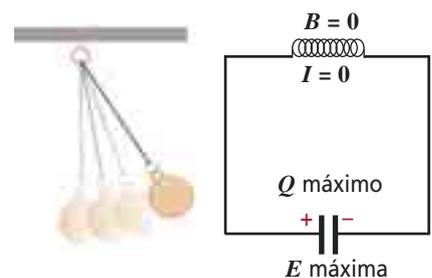


Una vez más comienza el proceso de descarga del condensador, la corriente invierte su sentido y empieza a aumentar. La energía comienza

a ser almacenada por el inductor. Cuando el condensador se ha descargado por completo la corriente vuelve a ser máxima. Esto es análogo a lo que sucede con el péndulo al volver a pasar por su posición de equilibrio: su energía cinética es máxima.



Luego, comienza nuevamente el proceso de carga del condensador, la corriente disminuye hasta anularse cuando el condensador se ha cargado completamente y la energía comienza a ser almacenada otra vez en el campo eléctrico del condensador. El péndulo nuevamente se encuentra en su posición inicial.



Circuitos RLC sin generador

En los circuitos que comúnmente se usan en televisores, computadores, equipos de música, etc., los elementos eléctricos tienen una resistencia eléctrica diferente de cero; por esto, resulta más útil modelarlos o representarlos considerando qué sucede al conectar además de un condensador y un inductor, un resistor en serie. Estos circuitos se denominan **RLC** o **circuitos oscilantes amortiguados**.

Al cerrar el interruptor S en un circuito **RLC**, la corriente y el voltaje en el circuito comenzarán a oscilar. Sin embargo, a diferencia del modelo **LC**, la amplitud de estas oscilaciones irá decreciendo en el tiempo. Esto sucede debido a que la energía electromagnética total en el circuito disminuye ya que, a medida que transcurre el tiempo, parte de la energía se disipa en el resistor en forma de calor. De igual forma ocurre con un sistema masa-resorte que se mueve, por ejemplo, en un vaso con agua, lo que causa una

disminución en las oscilaciones debido al roce con el agua.

La frecuencia de oscilación de un circuito amortiguado **RLC** está dada por la relación:

$$\omega_a = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

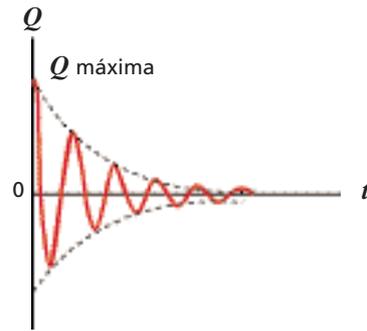
La variación del voltaje en función del tiempo en este tipo de circuitos se determina como:

$$V_C(t) = V_0 e^{-Rt/2L} \cos(\omega_a t)$$

Al comparar la frecuencia para un circuito **RLC** con la frecuencia para un circuito **LC** ($\omega = [1/(LC)]^{1/2}$) se nota que: a medida que aumenta el valor de la resistencia, las oscilaciones se amortiguan más rápidamente.

Existe un valor límite, llamado resistencia crítica (R_C), a partir del cual no ocurren oscilaciones. Su valor se calcula como:

$$R_C = \sqrt{\frac{4L}{C}}$$



En un circuito **RLC**, la energía eléctrica total no es constante, sino que disminuye en el tiempo.

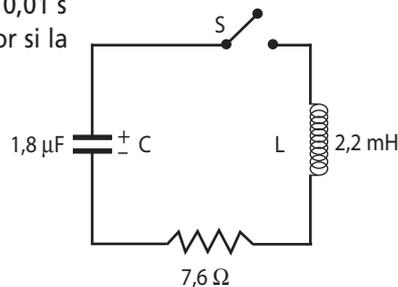


En un circuito **RLC** las oscilaciones se amortiguan, tal como sucede en un sistema masa-resorte oscilando al interior de un vaso con líquido.

PARA CALCULAR

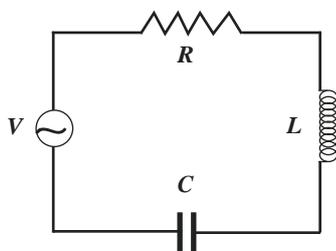
Analiza el circuito **RLC** de la figura y determina:

- a) La frecuencia de oscilación del circuito (expresada en hertz).
- b) El valor de la resistencia crítica.
- c) El valor del voltaje al cabo de 0,01 s de haber cerrado el interruptor si la carga inicial del condensador era de 5,4 μC .



2.3 Oscilaciones eléctricas forzadas: circuito RLC con generador

Las oscilaciones eléctricas forzadas se producen cuando agregamos un voltaje alterno de la forma $V = V_0 \text{sen}(\omega t)$ a un circuito *RLC*.



Consideremos un circuito *RLC* en que los elementos están conectados en serie. En cada uno de ellos, es posible comprobar que el voltaje máximo (V_0) es directamente proporcional a la intensidad de corriente máxima (I_0). La constante de proporcionalidad se denomina reactancia (X) del elemento (es el equivalente a la resistencia R en un resistor) y su unidad de medida en el SI es el ohm (Ω).

La *Tabla 3* muestra la reactancia asociada a cada elemento del circuito y la forma de calcularla:

La forma en que están relacionadas la reactancia X , la corriente máxima I_0 , y el voltaje máximo V_0 para cada elemento es:

$$V_{0R} = I_0 X_R = I_0 R \quad \text{para el resistor}$$

$$V_{0L} = I_0 X_L = I_0 L \omega \quad \text{para el inductor}$$

$$V_{0C} = I_0 X_C = \frac{I_0}{C \omega} \quad \text{para el condensador}$$

Para un valor dado de inductancia, la reactancia inductiva X_L , que es como una resistencia debida a la f.e.m. inducida por la corriente variable que circula por ella (autoinducción), crece con la frecuencia, es decir, un inductor (bobina) presenta más dificultad al paso de las corrientes de alta frecuencia que a las de baja frecuencia. En el límite de frecuencias, cuando $\omega = 0$ (c.c.), se produce el cortocircuito. Contrariamente, un condensador presenta más dificultad al paso de corrientes de baja frecuencia que a las de alta frecuencia. En el límite de frecuencias (c.c.), se interrumpe la corriente.

En el circuito *RLC*, el voltaje máximo está dado por:

$$V_0 = I_0 Z$$

donde la impedancia (Z) es la constante de proporcionalidad entre el voltaje máximo aplicado y la corriente máxima en un circuito *RLC*. Su unidad también es el ohm (Ω) y su valor se calcula a través de la expresión:

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

Esto significa que el circuito en su conjunto se comporta como si tuviera una resistencia Z .

NOTA

Al conectar un condensador a un generador alterno, el cambio de polaridad en cada ciclo provoca cargas y descargas sucesivas del condensador en una y otra placa, lo que se traduce en una corriente eléctrica alterna en el conjunto del circuito. Al respecto, **James C. Maxwell** señaló que no solamente se debe considerar una corriente como un movimiento de cargas, sino que también cualquier variación del campo magnético, a lo que llamó **corrientes de desplazamiento**.

TABLA 3: REACTANCIAS

Elemento del circuito	Nombre de la reactancia	Notación	Formula
Resistor	Reactancia óhmica	X_R	$X_R = R$
Condensador	Reactancia capacitiva	X_C	$X_C = \frac{1}{\omega C}$
Inductor	Reactancia inductiva	X_L	$X_L = \omega L$

Donde: $\omega = 2\pi f$; f = frecuencia del generador

2.4 Resonancia en un circuito RLC

Se dice que un circuito **RLC** se encuentra en **resonancia** cuando la frecuencia del voltaje aplicado es igual a la frecuencia propia del oscilador. Cuando se produce el fenómeno de resonancia, la reactancia inductiva (X_L) es igual a reactancia capacitiva (X_C):

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

por lo que la impedancia (Z) del circuito, que resulta ser mínima y la corriente máxima, es igual a la reactancia óhmica (X_R).

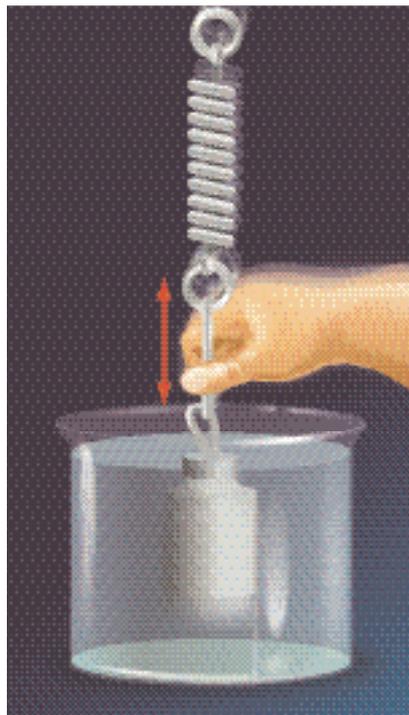
$$Z = X_R$$

La frecuencia a la cual se produce la resonancia (en términos de f) se denomina frecuencia de resonancia f_0 y su valor se calcula a través de la expresión:

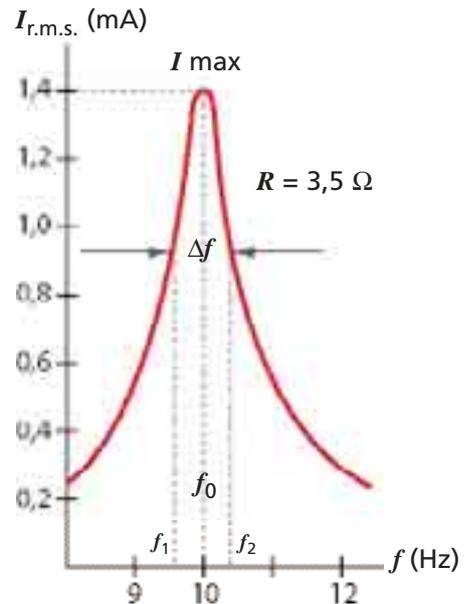
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

A frecuencias menores a la de resonancia, el valor de la reactancia capacitiva es grande y la impedancia es capacitiva. A frecuencias superiores a la de resonancia, el valor de la reactancia inductiva crece y la impedancia es inductiva.

Este fenómeno de resonancia es el fundamento del proceso de sintonía de las emisoras de radio, pues consiste esencialmente en regular los valores de un condensador de capacidad variable unido al dial del sintonizador para que la frecuencia natural del circuito coincida con la frecuencia de la emisora que se desea sintonizar.



Las oscilaciones electromagnéticas de un circuito RLC con generador se mantienen a una frecuencia f , al igual que un sistema masa-resorte como el de la figura.



Los circuitos resonantes son utilizados para seleccionar bandas de frecuencia y para rechazar otras.

La corriente alcanza su máximo valor para la frecuencia de resonancia f_0 , lo que se observaría si conectamos un osciloscopio al circuito. A una corriente menor (70% de la máxima), la frecuencia f_1 se llama frecuencia baja de corte y a f_2 , frecuencia alta de corte. El ancho de banda (Δf) de este circuito está entre estas dos frecuencias y se obtiene con la siguiente fórmula: $\Delta f = f_2 - f_1$

El **factor de calidad (Q)** o factor Q es: $Q = X_L / R$ ó $Q = X_C / R$
La relación con el ancho banda es: $Q = f_0 / \Delta f$

Por ejemplo, si $f_1 = 50$ kHz, $f_2 = 80$ kHz entonces $f_0 = 65$ kHz, y el factor de calidad es: $Q = 2,17$
Si $f_1 = 60$ kHz y $f_2 = 70$ kHz, entonces $f_0 = 65$ kHz, y el factor de calidad es: $Q = 6,5$

El factor de calidad es mejor a menor ancho de banda, es decir, el circuito es más selectivo. Un circuito sintonizado para favorecer una determinada frecuencia, deja pasar siempre otras frecuencias próximas, por encima y por debajo de aquella. El grado de rechazo (o atenuación) de las frecuencias próximas no deseadas se llama selectividad. En los receptores es necesaria para que se reciba solo la señal que nos interesa.

TALLER 2: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Conéctate a la página www.santillana.cl/fis4 y abre el **Taller 2 de la Unidad 1**.

Allí encontrarás una actividad en la que podrás experimentar con la generación de una corriente eléctrica por inducción electromagnética.

Ejercicio resuelto 7

Un condensador de $50 \mu\text{F}$ se encuentra conectado a una fuente alterna que suministra una salida sinusoidal de 50 Hz con un voltaje máximo de 311 V .

a) ¿Cuál es la reactancia del condensador del circuito?

Al remplazar los datos entregados en la relación descrita para la reactancia capacitiva, se obtiene:

$$X_C = \frac{1}{2\pi(50\text{Hz})(50 \times 10^{-6}\text{F})} = 63,7\Omega$$

b) ¿Cuál es la corriente eficaz en el circuito?

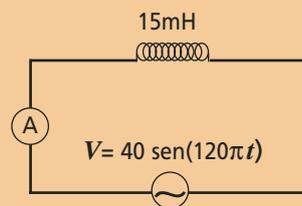
Para encontrar la corriente eficaz o r.m.s. en el circuito, se debe utilizar la relación: $V_{r.m.s.} = X_C I_{r.m.s.}$. Recordando que

$$V_{r.m.s.} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (V_0 = \text{voltaje máximo})$$

$$I_{r.m.s.} = \frac{311\text{V}}{63,7\Omega \sqrt{2}} = 3,5\text{A}$$

Ejercicio resuelto 8

Se tiene un circuito inductivo como el de la figura.



a) Determinar el voltaje máximo entregado por el generador a.c. y la frecuencia de la señal alterna.

Para encontrar el voltaje máximo (V_0) y la frecuencia (f) se debe comparar la señal alterna de un generador a.c. con la señal que entrega el generador del circuito.

$$V_0 \text{ sen } (2\pi f t) = 40 \text{ sen } (120\pi t)$$

$$V_0 = 40 \text{ V} \quad \text{y} \quad f = 60 \text{ Hz}$$

b) Determinar la intensidad de corriente $I_{r.m.s.}$ que mide el amperímetro A.

Para determinar la intensidad de corriente $I_{r.m.s.}$ se debe utilizar la reactancia inductiva X_L : $V_{r.m.s.} = X_L I_{r.m.s.}$

Calculemos en primer lugar la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi (60 \text{ Hz}) (15 \times 10^{-3} \text{ H}) = 5,7 \Omega$$

Por lo tanto, el valor de $I_{r.m.s.}$ es:

$$I_{r.m.s.} = \frac{40\text{V}}{5,7\Omega \sqrt{2}} = 5\text{A}$$

Ejercicio resuelto 9

Un circuito RLC , formado por un resistor de 50Ω , un inductor de $200 \mu\text{H}$ y un condensador de $0,05 \mu\text{F}$, está conectado a un generador de corriente alterna que entrega $150 V_{r.m.s.}$

a) Determina la frecuencia de resonancia f_0 .

Se sabe que la resonancia ocurre para una frecuencia particular f_0 dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi(LC)^{1/2}} = 1,59 \text{ kHz}$$

b) Determina la impedancia del circuito en este caso.

Para determinar la impedancia Z del circuito, recordemos la relación descrita anteriormente:

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

Pero en la resonancia ocurre que $X_L = X_C$, por lo que $Z = R$.

De acuerdo a lo anterior, resulta:

$$Z = 50 \Omega$$

c) Determina la intensidad de corriente r.m.s. en el circuito.

Para hallar la $I_{r.m.s.}$ en el circuito, se debe utilizar la relación: $V_{r.m.s.} = Z I_{r.m.s.}$

Por lo tanto, el valor de $I_{r.m.s.}$ es:

$$I_{r.m.s.} = \frac{150V}{50\Omega} = 3A$$

Al remplazar los valores que están en el enunciado del problema resulta:

Gracias a los resultados experimentales de Oersted, Faraday y de Henry, es posible obtener corriente al transformar energía mecánica en energía eléctrica.

La ley de Faraday y Lenz sostiene que una variación de flujo magnético a través de una espira conductora induce una fuerza electromotriz, cuya polaridad es tal que la corriente inducida en ella se opone a la variación del flujo que la produjo. En el experimento de Oersted, no era necesario que la corriente fuera variable para producir magnetismo.

Los transformadores tienen una bobina primaria y otra secundaria con diferente cantidad de espiras unidas mediante un núcleo de hierro. En ellos se cumple la ley de Faraday y Lenz, y son utilizados para transmitir energía eléctrica desde un lugar a otro variando la intensidad de la corriente y el voltaje.

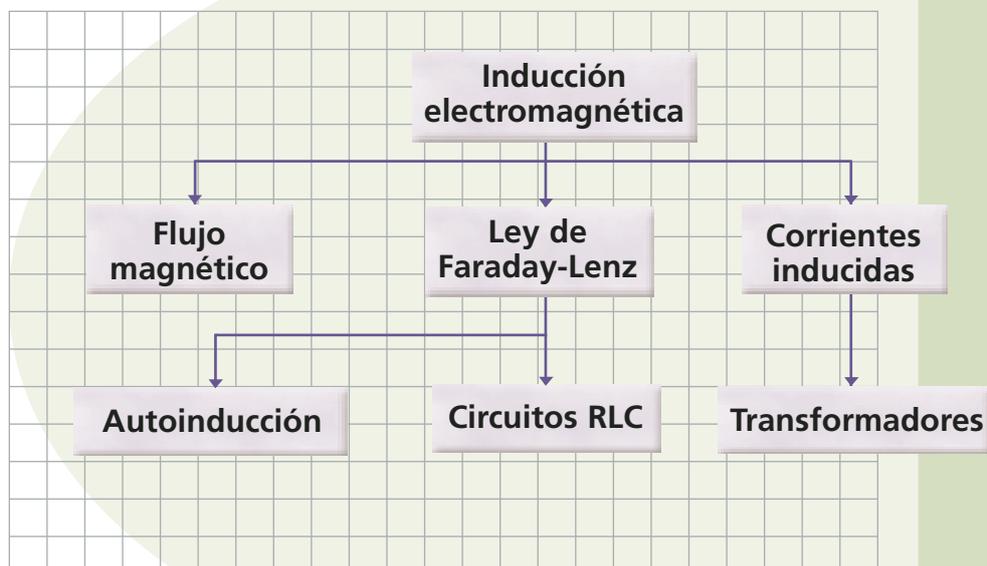
La variación del flujo magnético puede ser producida por una variación del área de la espira o por una variación en el vector de campo magnético.

Los generadores de corriente alterna producen intensidades de corriente y voltajes que varían sinusoidalmente en el tiempo.

A continuación te entregamos un mapa conceptual general de los contenidos del tema: Electromagnetismo y circuitos eléctricos.

Resumen

Mapa conceptual



- Ahora elabora en tu cuaderno tu propio mapa conceptual, incorporando los conceptos que aparecen en el mapa conceptual propuesto y otros como los que aparecen en el glosario de la página siguiente.

Glosario

Autoinducción. También llamada inducción. Es la generación de una f.e.m. en una bobina que se opone al cambio de flujo magnético.

Autoinductancia. También llamada inductancia. Es una característica de la bobina que depende de su geometría y corresponde a la constante de proporcionalidad entre la f.e.m. autoinducida y la rapidez con que cambia la corriente.

Corriente alterna. Circuitos en los cuales la corriente que circula por ellos, y su valor, cambia su sentido periódicamente. Son alimentados por una fuente o batería que entrega una f.e.m. alterna.

Corriente continua. Circuitos en los cuales la corriente que circula por ellos, mantiene su sentido y su valor. Son alimentados por una fuente o batería que entrega una f.e.m. continua.

Circuito LC. Circuito de corriente alterna formado por un inductor y un condensador.

Circuito RC. Circuito de corriente alterna formado por un resistor y un condensador.

Circuito RLC. Circuito de corriente alterna formado por un resistor, un inductor y un condensador.

Fuerza electromotriz (f.e.m.). Es otra forma de llamar a la diferencia de potencial. Corresponde a la fuerza que “empuja” a los electrones desde el potencial mayor al menor.

Flujo magnético. El flujo magnético corresponde al número de líneas de campo magnético que atraviesan una superficie.

Impedancia. Es un equivalente a la resistencia total en un circuito de corriente alterna.

Inducción electromagnética. Fenómeno en el que un flujo de campo magnético variable genera una corriente eléctrica.

Ley de Faraday. Ley que establece que una variación de flujo magnético a través de un circuito induce en él una fuerza electromotriz (f.e.m.).

Ley de Lenz. Sostiene que la f.e.m. inducida crea una corriente que siempre recorre el conductor en un sentido tal de producir un campo magnético interno cuyo flujo se opone al cambio de flujo externo que la induce.

Reactancia. Es un equivalente a la resistencia que hay en un condensador o en una bobina.

Resonancia. Consiste en un aumento de la amplitud de las oscilaciones de un sistema cuando la frecuencia externa aplicada sobre él es igual a su frecuencia propia de vibración.

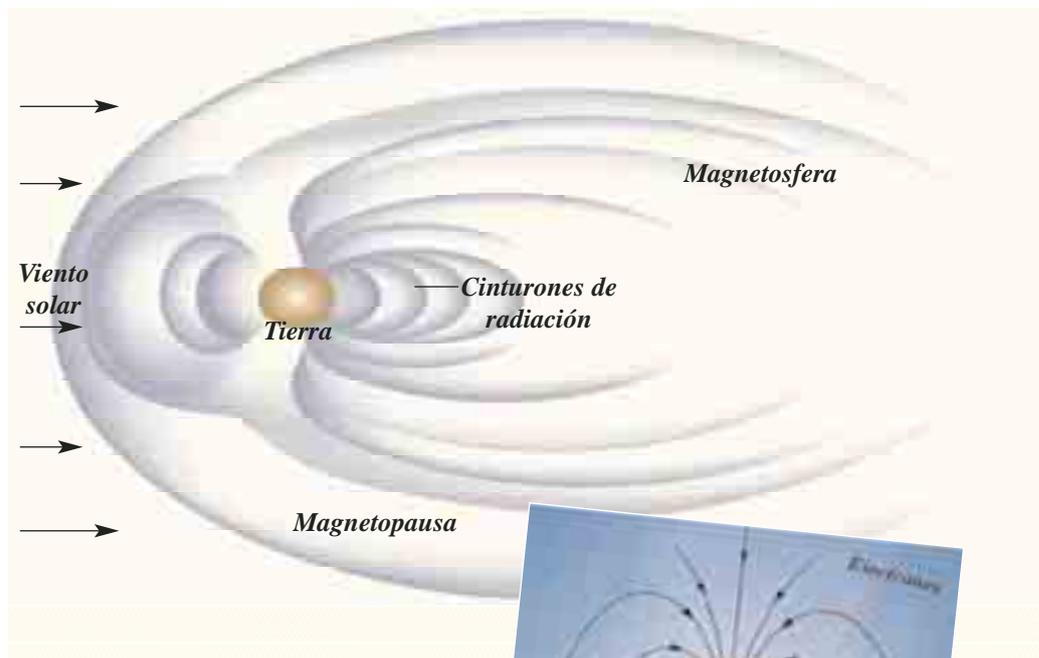
Física aplicada

Cinturones de radiación de Van Allen

Son dos regiones formadas por partículas de alta energía, sobre todo protones y electrones, contenidas en el campo magnético terrestre. El cinturón interno se extiende de 800 km a 3.000 km sobre la superficie de la Tierra, mientras que el cinturón exterior se extiende hasta aproximadamente 60.000 km de la Tierra. Ambas regiones forman conjuntamente la magnetosfera, y están separadas entre sí por una frontera llamada magnetopausa. Fueron descubiertos en 1958 por el físico norteamericano James Van Allen.

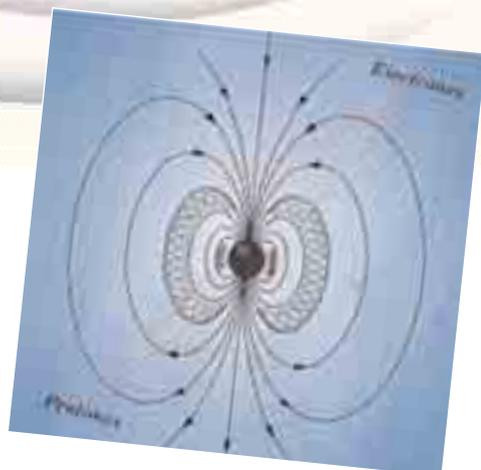
Las partículas que constituyen los cinturones de Van Allen tienen su origen en los flujos de electrones y de protones que nos llegan desde el Sol bajo la forma de viento solar.

El cinturón interior está formado por protones y electrones que provienen de la desintegración de los neutrones producidos en la atmósfera por la acción de los rayos cósmicos. El cinturón exterior está formado principalmente por partículas cargadas que han sido proyectadas por el Sol. La variación del número de partículas está asociado con la actividad del Sol. Las partículas que salen del cinturón causan las auroras.



El campo magnético lejos de la superficie de la Tierra, es tan débil que se pueden observar las modificaciones que resultan de la acción del viento solar. Cerca de la Tierra, el campo es más intenso y las partículas eléctricas del viento solar circulan a lo largo de las líneas de campo magnético.

La figura ilustra el campo magnético terrestre mostrando protones y electrones atrapados en los cinturones de Van Allen.



Comprueba lo que sabes

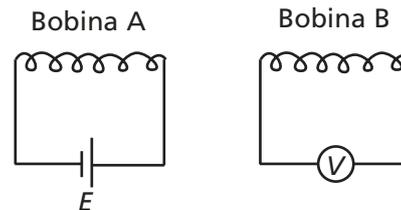
- “La rapidez con que la energía eléctrica se transforma en otro tipo de energía”, el enunciado corresponde a:
 - campo eléctrico.
 - campo magnético.
 - potencia.
 - voltaje.
 - corriente.
- Analiza las siguientes frases:
 - Toda carga eléctrica crea un campo magnético.
 - Toda corriente eléctrica crea un campo magnético.
 - Toda carga eléctrica en movimiento crea un campo eléctrico y magnético.
 - Todo campo magnético origina una corriente eléctrica.

Son correctas:

- I, II y III.
 - II, III y IV.
 - II y III.
 - Todas.
 - Ninguna.
- ¿De qué forma sería imposible inducir una corriente en un alambre conductor?
 - Moviendo el alambre cerca de un imán.
 - Moviendo un imán cerca de un alambre conductor.
 - Cambiando la intensidad de corriente que circula por otro alambre cercano.
 - Poniendo en contacto un alambre conductor con un imán.
 - Ninguna.
 - En un circuito de corriente alterna, *RLC* en serie, se puede afirmar correctamente que:
 - la impedancia se mide en hertz.
 - la capacidad del condensador se mide en ohm.
 - la reactancia capacitiva se mide en ohm.
 - la corriente del circuito se mide en volt.

Es o son correctas:

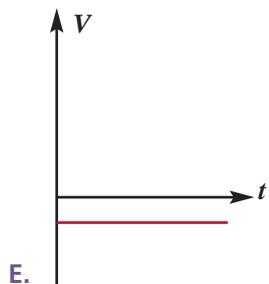
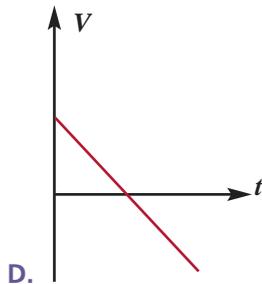
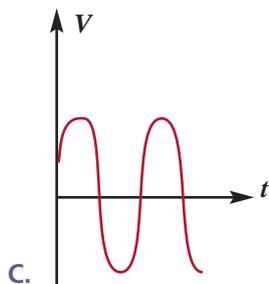
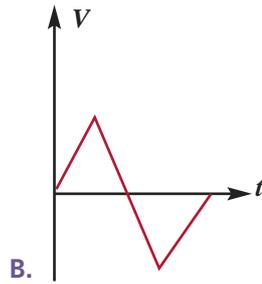
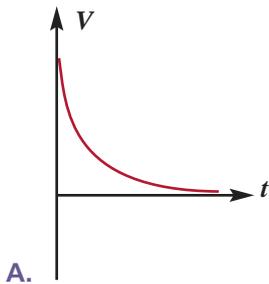
- I y II
 - II y III
 - III y IV
 - II
 - III
- ¿Qué transforma un transformador?
 - Potencia.
 - Corriente.
 - Voltaje.
 - Carga eléctrica.
 - Ninguna.
 - Tenemos dos bobinas separadas, una conectada a una batería *E* y otra a un voltímetro *V*. El voltímetro no detecta una corriente inducida cuando la fuente conectada a la bobina *A* entrega:
 - voltaje continuo.
 - voltaje alterno.
 - corriente continua
 - Falta información.
 - Ninguna de las respuestas anteriores.



- voltaje continuo.
 - voltaje alterno.
 - corriente continua
 - Falta información.
 - Ninguna de las respuestas anteriores.
- Las unidades de medida de capacidad, corriente e inductancia son respectivamente:
 - F, A y H
 - A, F y H
 - F, A y C
 - C, F y H
 - Ninguna.

Comprueba lo que sabes

8. Se introduce un imán dentro de una bobina periódicamente. Si la bobina está conectada a un osciloscopio (instrumento que permite visualizar las características de las señales eléctricas), ¿cuál de los siguientes gráficos (Voltaje en función del tiempo) representa mejor la imagen en la pantalla de este instrumento?



9. Un circuito en serie de c. a. contiene un resistor de 20Ω , un condensador de $0,75 \text{ mF}$ y un inductor de 120 mH . Si se aplica un voltaje efectivo de 120 V a $f = 500 \text{ Hz}$, ¿cuál es la corriente efectiva del circuito?

- A. 2,3 A
- B. 6 A
- C. 10 A
- D. 17 A
- E. Ninguna.

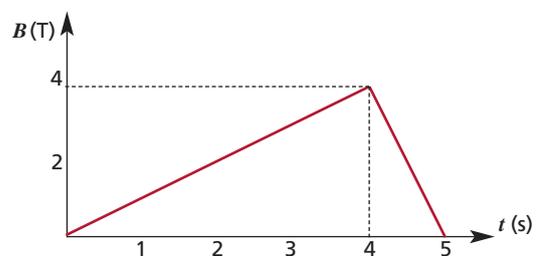
10. Si el circuito anterior se encuentra en resonancia, ¿cuál es el valor de la corriente?

- A. 2,4 A
- B. 6 A
- C. 10 A
- D. 17 A
- E. Ninguna.

11. En un circuito RLC en serie, $R = 25 \Omega$, $L = 30 \text{ mH}$ y $C = 12 \text{ mF}$. Están conectados a una fuente de 90 V alterno (r.m.s.) y 500 Hz . El voltaje a través de C es:

- A. 33,1 V
- B. 118 V
- C. 31,2 V
- D. 315 V
- E. Ninguna.

12. Una espira cuadrada de 10 cm de lado está situada en una zona en la que hay un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la espira. La intensidad del campo magnético varía con el tiempo en la forma que representa la figura. Calcula la f.e.m. inducida y represéntala gráficamente.



Generador de potencia pulsada

Estamos familiarizados con la descripción de tres fases de la materia, pero ¿cómo será la fase de la materia al interior de una estrella, o en el rayo de una tormenta eléctrica? Para responder esto, tenemos que introducir el concepto de plasma. Se entiende por plasma una mezcla gaseosa de iones positivos y electrones, que se produce cuando un gas se calienta a temperaturas tan altas que los átomos del gas se ionizan debido a las colisiones entre ellos.

En Chile se realizan investigaciones para producir plasmas y estudiar sus propiedades usando **generadores de potencia pulsada**. Una de las formas de producir plasma es con descargas eléctricas pulsadas. Por ejemplo, en un par de electrodos entre los que hay gas se aplica alto voltaje (miles de volts) en un tiempo muy corto (fracciones de segundo), así el gas se ioniza, produciendo un "rayo". Usando fotografías ultrarrápidas, se ha logrado captar imágenes de la secuencia de descarga a través de un gas y de la geometría que adopta el plasma en el tiempo.

Desde el año 2002 funciona en nuestro país un equipo llamado SPEED 2 donado por la Universidad de Düsseldorf (Alemania) a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). El SPEED 2 es el generador para descargas pulsadas de mayor potencia en el hemisferio sur.

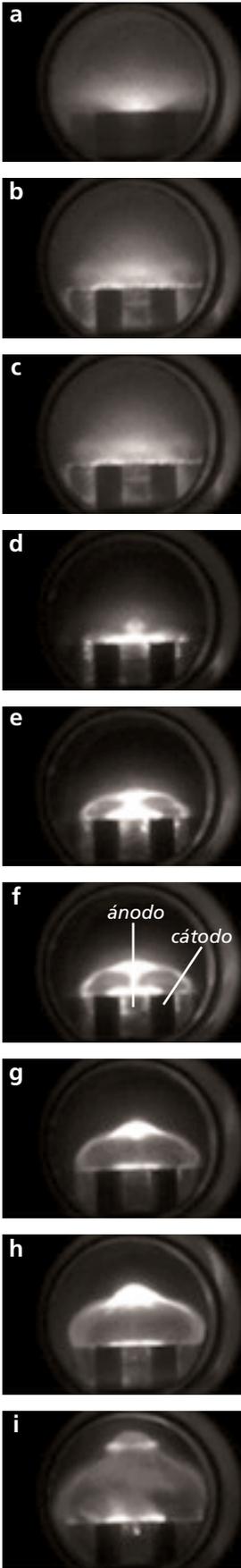
Funcionamiento del generador

El generador es capaz de almacenar 187 mil joules de energía eléctrica, que la transforma en un pulso de corriente de cuatro millones de amperes. Esta energía se almacena en 40 líneas de condensadores y se descarga en un gas contenido en el centro del equipo, donde se produce plasma durante medio microsegundo.

Antes de ingresar el gas (que puede ser deuterio, o una mezcla de hidrógeno con argón) en la cámara, se hace un vacío de 10^{-5} mb (mb: milibar, una milésima parte de la presión atmosférica), luego que ingresa el gas, la presión es del orden de algunos mb. La temperatura que alcanza el gas en su región más densa, en el momento de la descarga, es de unos 5.500.000 a 11.000.000 °K. Es importante notar, que para capturar información de lo que ocurre en intervalos tan cortos como en la descarga, es necesario usar alta tecnología digital en la que cumple un importante rol un osciloscopio capaz de discernir señales con un intervalo de 10^{-11} s.

Secuencia de lo que ocurre al interior de la cámara de descarga: entre la primera (a) y la última (i) imagen, han transcurrido 600 nanosegundos (6×10^{-7} s). La forma que adquiere el plasma está determinada en gran parte por la geometría que tienen los electrodos (ánodo y cátodo), y por el campo magnético inducido que producen las cargas al pasar de un electrodo a otro.

Gentileza del Departamento de Plasmas Termonucleares, Comisión Chilena de Energía Nuclear.





Fotografía de la cámara de descarga del SPEED 2.



La fotografía muestra la instalación del SPEED 2.

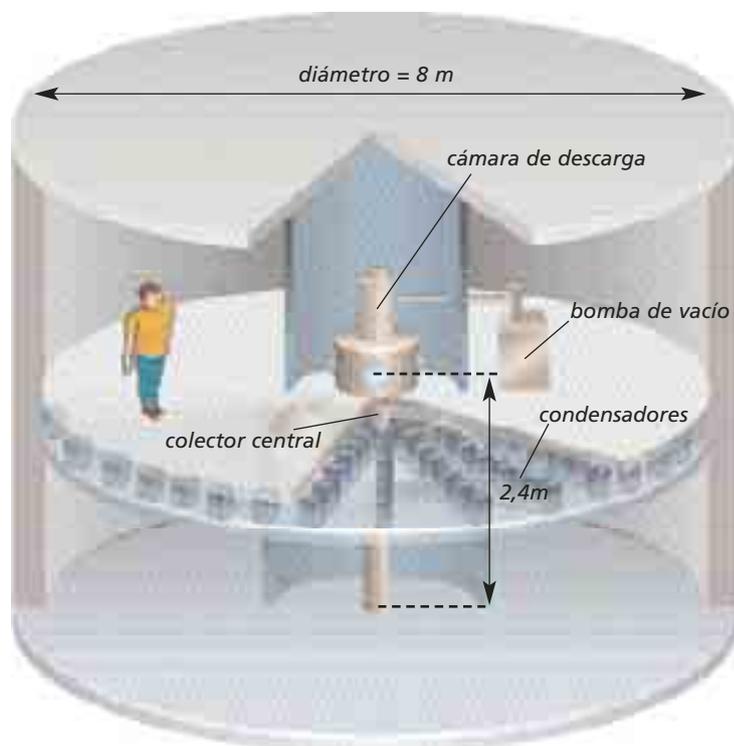
La potencia que desarrolla el SPEED 2 en una descarga es de alrededor de 500 mil millones de watts (recuerda que la potencia es la energía liberada en un intervalo de tiempo $1 W = 1 J/s$). Esta potencia es 1.200 veces mayor que la que produce una central hidroeléctrica como Colbún Machicura en la VII Región. El secreto está en que la energía que se descarga en el gas, aunque no es mayor que la necesaria para hervir medio litro de agua, se libera en una fracción muy corta de tiempo (media millonésima de segundo).

Dispositivos hechos en Chile

El grupo de físicos de la Comisión Chilena de Energía Nuclear que trabaja en el SPEED 2 ha desarrollado paralelamente dispositivos de plasmas a pequeña escala y únicos en el mundo que funcionan con tan solo 400 joules y 50 joules. Incluso ha desarrollado un generador de potencia pulsada ultraminiaturizado, el más pequeño del mundo, que libera una cantidad de energía menor que 1 joule. La ventaja de estos dispositivos es que la densidad del plasma (10^{19} partículas por metro cúbico) y su temperatura se mantienen prácticamente igual que en el SPEED 2, lo que permite estudiar las características de plasmas de este tipo utilizando menos energía.

El desarrollo de estos prototipos por parte de científicos chilenos es muy importante, ya que abre el camino para nuevas investigaciones a menor costo, en un tema tan importante como es el estudio de plasmas, ya que en esa fase de la materia se produce la fusión nuclear, proceso que libera una importante cantidad de energía y que no deja residuos radiactivos.

Esquema del Generador de potencia SPEED 2.



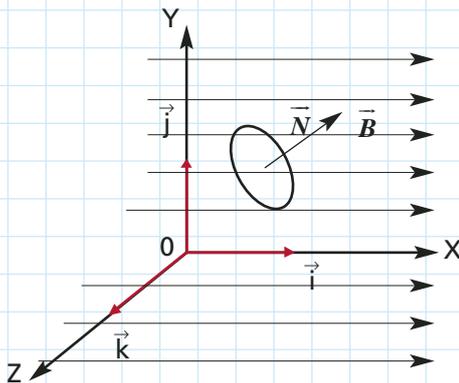
Ejercicios

1 En el laboratorio se dispone de una espira y un imán. Anota lo que ocurre en los siguientes casos:

- a) Se mueven conjuntamente ambos elementos.
- b) Se deja fija la espira y se mueve el imán.
- c) Se deja fijo el imán y se mueve la espira.
- d) ¿Qué influencia tiene en los aparatos anteriores la velocidad del elemento móvil?
- e) Si en lugar de un imán se dispone de una bobina por la que circula una corriente, ¿qué sucede al aumentar la intensidad de corriente en la bobina?

2 Una espira circular de 5 cm de radio está situada en el interior de un campo magnético uniforme de 0,5 T orientado en el eje OX. Calcula el flujo que atraviesa la espira cuando el vector normal a la superficie (\vec{N}) tiene las siguientes direcciones:

- a) \vec{i}
- b) \vec{j}
- c) $\vec{i} + \vec{j}$
- d) $\vec{i} + \vec{k}$
- e) \vec{k}

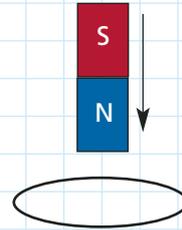


(Los vectores \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} tienen módulo uno y están orientados según x, y, z, respectivamente, en los ejes cartesianos)

3 Si en un circuito *RLC* en serie aumenta la frecuencia f , ocurre que:

- a) la reactancia inductiva aumenta.
- b) la reactancia capacitiva aumenta.
- c) la inductancia disminuye.
- d) la capacidad aumenta.

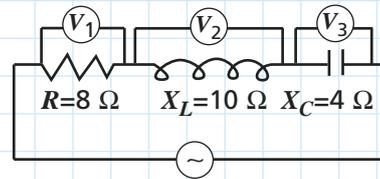
4 Un imán recto cae por el centro de la espira circular.



La corriente eléctrica inducida en el conductor, antes y después de atravesar la espira, circula, respectivamente, observada desde arriba:

- a) en sentido positivo, en sentido negativo.
- b) en sentido negativo, en sentido positivo.
- c) en sentido positivo, en sentido positivo.
- d) en sentido negativo, en sentido negativo.
- e) en ningún sentido positivo, es cero antes y después.

5 Por el circuito de la figura, circula una corriente de 5 A. Determina:



- a) El valor de los voltajes V_1 , V_2 y V_3 .
- b) El valor de la tensión alterna aplicada.

6 En un circuito *RLC* en serie, la reactancia inductiva es de 20 Ω y la reactancia capacitiva es de 10 Ω , para cierta frecuencia ω . La frecuencia de resonancia del circuito es 104 rad/s. Determina los valores de L y C .

La Física en la historia



Faraday no recibió instrucción matemática, lo que no fue un obstáculo para sus investigaciones, ya que poseía el olfato casi instintivo para lo esencial y sus relaciones, lo que distingue al gran investigador y científico.



James Clerk Maxwell dio a los postulados de Faraday acerca del efecto eléctrico de un campo magnético cambiante, una forma matemática exacta. Además, el propio Maxwell comenta sobre su propia obra lo siguiente: "Precisamente he emprendido esta obra con la esperanza de poder dar expresión matemática a las ideas y métodos de Faraday".

Electromagnetismo

En el año 1931 se realizó en Londres una gran exposición de adelantos eléctricos. En una enorme sala se encontraban las más diversas maquinarias eléctricas de tamaños imponentes y de compleja construcción. Lo interesante de la exhibición es que al caminar hacia el interior de la gran sala, se podía reconstruir desde sus comienzos, toda su historia. Esto era posible, porque todas las máquinas tenían a sus predecesoras a su lado, y al llegar al final de cada pasillo de la muestra, el visitante se encontraba con una simple versión experimental y cuadernos de notas que contaban el origen de cada artefacto.

Todas estas primeras piezas experimentales y notas estaban agrupadas alrededor de la imagen de un solo hombre, Michael Faraday, responsable de lo allí exhibido, y de quien nacieron ramas completas de la industria y que además, revolucionaron la economía mundial. Pudiendo con esto hacer gran fortuna, Faraday vivió y murió como hombre pobre.

Para la época, tres hechos estaban comprobados:

- Un imán puede magnetizar a otros cuerpos ferrosos.
- Un cuerpo con carga eléctrica puede inducir una carga eléctrica en otro cuerpo no cargado (inducción).
- Una corriente eléctrica hace posible efectos magnéticos (Oersted).

Faraday enfocó sus investigaciones hacia la electricidad, formulándose dos interrogantes: Si una corriente eléctrica produce efectos magnéticos, ¿podría un imán provocar una corriente eléctrica? Faraday realizó una serie de experimentos, y en uno de ellos enrolló un carrete con alambre de cobre y conectó sus extremos a un galvanómetro. En el interior del carrete ubicó un imán, el que posteriormente hizo entrar y salir. En el experimento, la aguja del galvanómetro no mostró ninguna desviación mientras el imán permanecía quieto al interior del carrete. En cambio, se evidenciaba un movimiento repentino de la aguja hacia un lado, si el imán entraba, y hacia el otro, si este salía del carrete. Con esto Faraday concluyó que sí es posible producir una corriente eléctrica, y su sentido depende del movimiento de la pieza magnética.

La segunda interrogante que se formuló Faraday fue: ¿es posible que una corriente que fluye por un alambre pueda inducir una corriente en otro alambre? En esta ocasión debió experimentar con dos carretes diferentes. Los terminales de un alambre estaban conectados a una batería y los otros permanecían aislados del primer carrete y se hallaban conectados a un galvanómetro. Este no experimentaba ninguna oscilación mientras la corriente pasaba por la conexión, pero sí ocurría cada vez que Faraday conectaba o desconectaba el contacto hacia la batería. El resultado de la experimentación le indicó que una corriente de flujo continuo no induce a ninguna otra corriente en un circuito cercano, pero al cerrar y abrir el contacto con la batería en el carrete primario, se inducen golpes eléctricos en el carrete secundario de forma alterna. Faraday llegó a estas conclusiones gracias a sucesivos experimentos realizados entre los meses de septiembre y octubre de 1831.