

BLOQUE III

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA(II)

Contenidos

1. Introducción y algunas experiencias.
 2. Fuerza magnética sobre una carga en movimiento: campo magnético y ley de Lorentz.
 - 2.1. Movimiento de una partícula cargada en el seno de un campo magnético.
 3. Acción de un campo magnético sobre un conductor rectilíneo.
 4. Aplicaciones de cargas en movimiento en el interior de un campo magnético.
 - 4.1. Selector de velocidades.
 - 4.2. Espectrómetro de masas.
 - 4.3. Ciclotrón.
 5. Campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida. Ley de Biot y Savart.
 6. Campo magnético creado por una espira y por un solenoide.
 7. Fuerza magnética entre dos corrientes rectilíneas e indefinidas.
 - 7.1. Definición de amperio.
 8. Ley de Ampère.
 9. Flujo magnético.
 10. Propiedades del campo magnético estacionario. Comparación con el electrostático.
 11. Ejercicios y actividades.
-

Criterios de evaluación

- III.8. Conocer el movimiento de una partícula cargada en el seno de un campo magnético.
- III.9. Comprender y comprobar que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos.
- III.10. Reconocer la fuerza de Lorentz como la fuerza que se ejerce sobre una partícula cargada que se mueve en una región del espacio donde actúan un campo eléctrico y un campo magnético.
- III.11. Interpretar el campo magnético como campo no conservativo y la imposibilidad de asociar una energía potencial.
- III.12. Describir el campo magnético originado por una corriente rectilínea, por una espira de corriente o por un solenoide en un punto determinado.
- III.13. Identificar y justificar la fuerza de interacción entre dos conductores rectilíneos y paralelos.

- III.14. Conocer que el amperio es una unidad fundamental del Sistema Internacional.
- III.15. Valorar la ley de Ampère como método de cálculo de campos magnéticos.

1. Introducción y algunas experiencias.

Los primeros fenómenos magnéticos de los que se tienen noticias están relacionados con el mineral de hierro encontrado cerca de la antigua ciudad griega de Magnesia. Se había observado que los fragmentos de este mineral, que recibe el nombre de magnetita, atraían pequeños trozos de hierro.

Los chinos, en el año 121 de nuestra era, sabían que una varilla de hierro puesta cerca de un imán natural adquiriría las mismas propiedades que éste y que, si se colgaba un imán de un hilo, se orientaba en la dirección norte sur.

El primer estudio sistemático de los fenómenos eléctricos y magnéticos fue realizado en la segunda mitad del siglo XVI, por el médico inglés William Gilbert. Gilbert diferenció los dos tipos de fenómenos y fue el primer científico, que consideró a la Tierra como un gran imán.

Los imanes atraen el hierro, siendo más pronunciado el efecto en determinadas zonas del imán llamadas polos.

En un imán se distinguen dos polos magnéticos, que designamos arbitrariamente como **norte** y **sur**, y que presentan la propiedad de repelerse si son de la misma polaridad y de atraerse si son de polaridad distinta.

Este hecho, unido a que la fuerza entre los polos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, llevó a pensar que los fenómenos magnéticos eran análogos a los eléctricos y estaban originados por una propiedad de la materia llamada polo magnético.

Una dificultad que se aprecia en esta teoría surge al comprobar que los polos magnéticos no se encuentran nunca separados como sucede con la carga eléctrica. En el estudio del magnetismo, esta dificultad se puede salvar si describimos las acciones magnéticas utilizando el concepto físico de campo. Un imán crea, en los puntos de su alrededor, un campo magnético que se pone de manifiesto al colocar en ellos otro imán o un cuerpo de material magnético.

Una forma de hacer "visible" este campo se obtiene cuando colocamos sobre un imán una hoja de papel y esparcimos limaduras de hierro sobre ella. En estas condiciones observamos que las limaduras se distribuyen sobre esta superficie de forma que nos proporcionan una idea de la geometría de las líneas del campo magnético.

Las líneas del campo magnético **son líneas cerradas**. Por convenio se admite que las líneas de campo salen del polo norte y entran por el polo sur del imán.

Hasta finales de 1819 no se demostró ninguna relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. La primera experiencia que puso de manifiesto la interrelación entre estos dos tipos de fenómenos fue debida al científico danés Hans Christian Oersted (1777-1851).

Oersted situó una brújula en las proximidades de un hilo conductor por el que hizo circular una corriente eléctrica continua. Observó que, cuando por el hilo pasa corriente, la aguja se orienta perpendicularmente al hilo. Por el contrario, cuando cesa el paso de la corriente, la aguja vuelve a su posición inicial. Si se invierte el sentido de la corriente, la aguja varía el sentido Norte - Sur.

El trabajo de Oersted demostró que el movimiento de las cargas eléctricas produce efectos magnéticos.

Experimentalmente se observa otra serie de fenómenos que refuerza la afirmación de que las cargas eléctricas en movimiento producen los mismos efectos que los imanes.

- ❖ Al situar dos conductores paralelos por los que circulan corrientes de intensidades grandes, aparecen fuerzas entre ambos, que son de atracción, si las corrientes llevan el mismo sentido y, de repulsión, si las corrientes llevan sentido contrario. Cuando cesa el paso de la corriente, las fuerzas dejan de actuar. La primera observación de este hecho fue realizada por Ampère, en el mismo año que realizó Oersted su experimento.
- ❖ También entre dos conductores circulares (espiras) paralelos, recorridos por sendas corrientes continuas, se producen fuerzas de atracción, si el sentido de la corriente que recorre a cada una de ellas es el mismo, y de repulsión, si estos sentidos son contrarios.
- ❖ Entre una espira por la que circula corriente continua y un imán permanente se generan también atracciones y repulsiones.

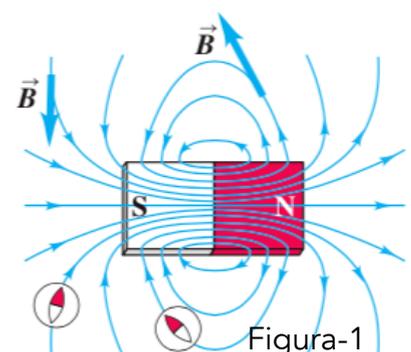
Podemos concluir: **una carga eléctrica produce un campo eléctrico y, si la carga está en movimiento, produce además un campo magnético.** La interrelación entre el campo eléctrico y el campo magnético da lugar al electromagnetismo.

Al igual que hicimos con las fuerzas gravitatorias y las fuerzas eléctricas, las fuerzas magnéticas también las describiremos usando el concepto de campo. Empezaremos este tema estudiando cómo las cargas eléctricas y las corrientes responden a los campos magnéticos; terminaremos estudiando cómo las cargas en movimiento producen campos magnéticos.

2. Fuerza magnética sobre una carga en movimiento: campo magnético y ley de Lorentz

De forma análoga a lo que hemos hecho para las interacciones gravitatoria y eléctrica, podemos hacer uso del concepto de campo para la interacción magnética; un imán, o una carga eléctrica en movimiento, dota a los puntos de su alrededor de una propiedad llamada **campo magnético**.

Al igual que en el campo gravitatorio o el campo eléctrico, el campo magnético se representa usando líneas de campo magnético. Las líneas de campo se dibujan de forma que la línea que pasa a través de cualquier punto sea tangente al vector del campo magnético en ese punto. Dada que la dirección del campo magnético, representado por \vec{B} , es única,



las líneas de campo nunca se cruzan.

De la figura-1 se deduce que las líneas de campo magnético no tienen puntos extremos (no existe el monopolo magnético), sino que son cerradas, y todas las líneas del campo magnético forman espiras cerradas.

Vamos a caracterizar el campo magnético, representado por \vec{B} , a partir de los efectos que produce sobre una carga eléctrica puntual sin entrar en el origen de este campo.

Si en un punto de un campo magnético se coloca una carga en reposo no se observa que actúen sobre ella fuerzas que no sean las conocidas; pero si la carga está en movimiento en una región del espacio en la que existe un campo magnético, entonces se ve sometida, además, a la acción de una nueva fuerza cuyas características, en cada punto por el que pasa la carga en movimiento son:

- ⊗ La fuerza es proporcional a la carga, y su sentido se invierte si cambiamos el signo de la carga.
- ⊗ La fuerza es proporcional al módulo de la velocidad (rapidez) con que la carga se mueve y a la intensidad del campo magnético.
- ⊗ La fuerza es perpendicular al vector velocidad y al vector campo magnético.
- ⊗ La fuerza es proporcional al seno del ángulo formado por los vectores velocidad y campo magnético.

Todas estas características permiten expresar la fuerza magnética (fuerza de Lorentz) sobre una carga en movimiento en la forma:

$$\vec{F} = q \left(\vec{v} \times \vec{B} \right) \quad \text{III_II.1}$$

Debido a que la fuerza es perpendicular a los vectores velocidad y campo magnético, resulta ser perpendicular al plano definido por estos dos vectores. El sentido de la fuerza viene dado por la regla del sacacorchos (si la carga es positiva). Es importante destacar que la ecuación III_II.1 no se deduce teóricamente, sino que es una observación basada en experimentos.

Si las direcciones de la velocidad y del campo magnético son perpendiculares, el valor de la fuerza magnética sobre la carga en movimiento es máximo, siendo su módulo:

$$F = qvB \quad \text{III_II.2}$$

De esta expresión, podemos obtener el módulo del vector \vec{B} :

$$B = \frac{F}{qv} \quad \text{III_II.3}$$

De acuerdo con III_II.3 la unidad en que se mide \vec{B} en el Sistema Internacional es Ns/Cm y se denomina Tesla (T). Con frecuencia se utiliza otra unidad denominada Gauss con la equivalencia: **1 tesla (T) = 10⁴ gauss (G)**

Cuando queremos representar la dirección del campo magnético \vec{B} perpendicular al plano del papel y dirigido hacia la página utilizaremos el símbolo del aspa rodeada, \otimes ; si, por el contrario queremos indicar que el campo magnético es perpendicular al papel y dirigido hacia el lector utilizaremos el símbolo \odot

En la figura-2 se puede comprobar cómo afecta el signo de la carga en el sentido de la fuerza:

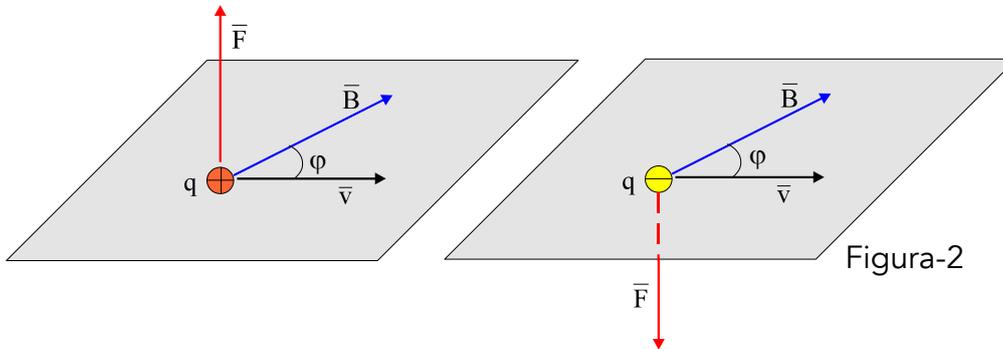


Figura-2

Según la ecuación III_II.1, la fuerza magnética sobre una carga en movimiento es perpendicular a la velocidad y por tanto, **NO REALIZA TRABAJO**. Esto significa que la energía cinética de una carga que se mueve en un campo magnético permanece constante.

Analizaremos ahora las características del movimiento de una partícula cargada en el seno de un campo magnético uniforme, es decir, un campo en el que \vec{B} es constante en módulo, dirección y sentido en todos sus puntos:

- ❖ Si la partícula cargada se mueve inicialmente en la dirección del campo, su velocidad no varía, y por tanto, su movimiento es rectilíneo y uniforme.
- ❖ Si la carga se mueve inicialmente en una dirección perpendicular al campo magnético, como la fuerza magnética sobre ella es perpendicular a su velocidad, la aceleración que le produce esa fuerza también será perpendicular a la velocidad. Esto significa que no existe aceleración tangencial y, por tanto, el módulo de la velocidad con que se mueve la carga permanece constante (movimiento uniforme)

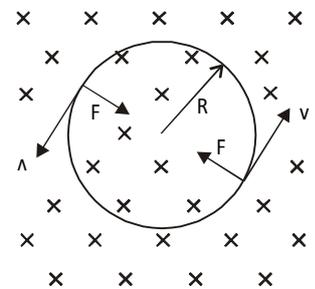


Figura-3

Si es m la masa de la partícula cargada, y aplicamos la segunda ley de Newton:

$$\vec{F}_{magn} = m \vec{a}_n \tag{III_II.4}$$

Como las direcciones de la velocidad y del \vec{B} son perpendiculares y recordando el valor de la aceleración normal, podemos escribir III_II.4 como:

$$qvB = m \frac{v^2}{R} \tag{III_II.5}$$

De donde se obtiene el radio de curvatura de la trayectoria que sigue la partícula cargada:

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \text{III_II.6}$$

Y como estas magnitudes son constantes, el radio de curvatura también lo es, por tanto, la trayectoria es circular (figura-3)

El período de ese movimiento es:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad \text{III_II.7}$$

en la que se ha sustituido el valor del radio de la expresión III_II.6, y que como podemos comprobar, no depende de la velocidad lineal de la partícula sino de la relación carga/masa y de la intensidad del campo magnético. A ese valor del periodo se le suele llamar **periodo del ciclotrón**.

2.1. Movimiento de una partícula cargada en el seno de un campo magnético.

De la ecuación III_II.1 se desprende que el sentido de giro de una partícula cargada que se mueve en el seno de un campo magnético depende del signo de la carga (ver figura -2). ¿Qué ocurre si la partícula se mueve inicialmente en una dirección oblicua respecto de la dirección del campo magnético \vec{B} ?

Podemos descomponer su velocidad en dos componentes perpendiculares entre sí, una que tenga una dirección igual a la del campo magnético y otra cuya dirección sea perpendicular a la dirección del campo. Esta componente dará lugar a un movimiento circular de las características descritas en el apartado anterior. De la composición de ambos movimientos resulta un movimiento helicoidal (la trayectoria es una hélice) en el que el radio y el paso permanecen constantes. Si el campo no fuera constante el radio de la hélice tampoco lo sería y el paso de la hélice también decrecería con el aumento de la intensidad del campo. Dado que la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad, el movimiento de una partícula cargada por la acción de un campo magnético es siempre un movimiento con el módulo de la velocidad constante.

Recapitulando, las cargas eléctricas en movimiento crean campos magnéticos, pero además, aunque estén en reposo, también crean campos eléctricos. A su vez, una carga que se ve sometida a una fuerza eléctrica experimenta también una interacción magnética, con una fuerza dada por la ley de Lorentz, cuando está en movimiento.

Supongamos que una carga q pasa con una velocidad v por un punto en el que la intensidad del campo eléctrico es \vec{E} y la del campo magnético es \vec{B} ; la fuerza total sobre esa carga será:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{III_II.8}$$

De esta forma describimos la interacción electromagnética entre cargas en movimiento separada en dos términos: el eléctrico, que es independiente de la velocidad y el magnético que depende de ella. Conviene dejar claro que esta separación tiene carácter relativo puesto que depende del sistema de referencia elegido.

3. Acción de un campo magnético sobre un conductor rectilíneo.

Cuando por un hilo situado en el interior de un campo magnético circula una corriente, existe una fuerza que se ejerce sobre el conductor que es el resultado de la suma de las fuerzas magnéticas sobre las partículas cargadas cuyo movimiento produce la corriente. Una corriente eléctrica que circula por un hilo conductor es en realidad un flujo de electrones que se mueven por el hilo en sentido contrario al que, por convenio, se otorga a la corriente. Esta situación es equivalente a imaginar que dicha corriente consiste en un flujo de hipotéticas cargas positivas recorriendo al conductor en el sentido contrario a los electrones. Supongamos ahora que N es el número de cargas libres que durante un cierto intervalo de tiempo, Δt , recorre un tramo de conductor rectilíneo de longitud ℓ (figura-4), la fuerza que actúa sobre ese tramo de conductor es:

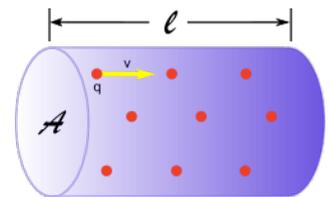


Figura-4

$$\vec{F} = Nq (\vec{v} \times \vec{B}) \tag{III_II.9}$$

por otro lado, la velocidad de arrastre o velocidad de desplazamiento de las cargas, se relaciona con la longitud del conductor mediante la expresión:

$$\vec{v} = \frac{\vec{\ell}}{\Delta t} \tag{III_II.10}$$

en donde $\vec{\ell}$, es un vector de módulo la longitud del hilo orientado en el mismo sentido de la corriente eléctrica; sustituyendo el valor de la velocidad en III_II.9:

$$\vec{F} = \frac{Nq}{\Delta t} (\vec{\ell} \times \vec{B}) \tag{III_II.11}$$

teniendo en cuenta que $\frac{Nq}{\Delta t}$, representa la cantidad de carga que atraviesa cualquier sección del conductor por unidad de tiempo, es decir la intensidad de corriente, I , la fuerza neta que actúa sobre un tramo de conductor es:

$$\vec{F} = I (\vec{\ell} \times \vec{B}) \tag{III_II.12}$$

expresión que se conoce con el nombre de **primera Ley de Laplace**. Esta fuerza es perpendicular al plano formado por el conductor y el campo magnético.

La expresión III_II.12 nos permite definir la **Tesla** como la intensidad de un campo magnético uniforme tal que una corriente rectilínea de 1 amperio de intensidad y de 1 metro de longitud, orientada perpendicularmente al campo, se ve sometida a una fuerza de 1 newton.

4. Aplicaciones de cargas en movimiento en el interior de un campo magnético.

Los principios que hemos descrito en los puntos anteriores tienen su implementación práctica en las aplicaciones que a continuación estudiaremos.

4.1. Selector de velocidades.

Cuando se dispone de un haz de partículas cargadas que poseen diferentes velocidades, se puede usar el denominado **selector de velocidades** para conseguir filtrar aquellas partículas que posean una determinada velocidad.

Un selector de velocidades (figura-5) es una zona del espacio en donde existen un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de la velocidad de las partículas.

El campo eléctrico, \vec{E} , ejerce una fuerza en dirección al campo, cuyo módulo es: $F_e = |q|E$.

El campo magnético ejerce una fuerza cuya dirección y sentido vienen dados por el producto vectorial: $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$, y su módulo por: $F_m = |q|vB$.

La partícula cargada no se desvía si las fuerzas son iguales y de sentido contrario, por tanto:

$$v = \frac{E}{B}$$

Solo atravesarán aquellas que tengan una rapidez que sea igual al cociente entre la intensidad del campo eléctrico y el campo magnético.

4.2. Espectrómetro de masas

Para determinar con precisión las masas atómicas, o separar isótopos se utiliza un aparato denominado espectrómetro de masas.

El primer espectrómetro de masas fue fabricado por el físico americano F.W. Aston en el año 1919 y mejorado posteriormente por K. Bainbridge.

En la figura -6 se muestra la variante construida por Bainbridge. Los iones positivos generados en la fuente pasan a través de un par de ranuras para formar un haz estrecho de iones. A continuación se seleccionan aquellos iones que tengan una velocidad que sea igual al cociente entre la intensidad del campo eléctrico y el campo magnético

(selector de velocidades), de manera que esos iones seleccionados penetren en otro campo magnético perpendicular a la velocidad moviéndose en arcos circulares con radios

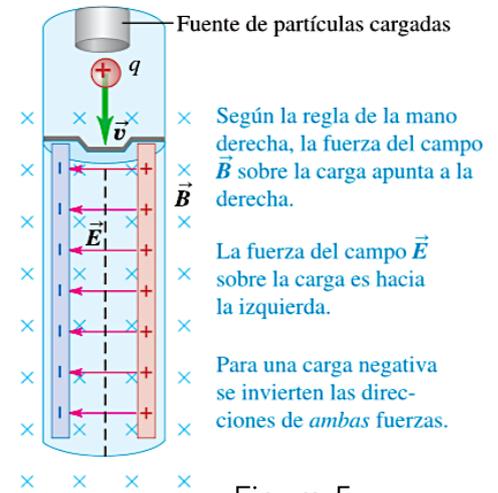
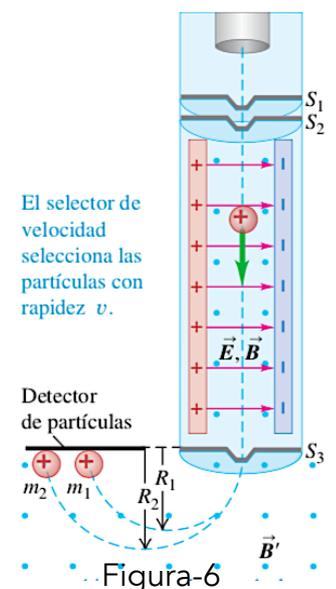


Figura-5

III_II.13



determinados por la ecuación III_II.6. Los iones con masas diferentes golpean al detector en diferentes puntos.

Tiene especial utilidad para comparar las masas de los isótopos.

4.3. Ciclotrón

Fue inventado en el año 1934 por los físicos estadounidenses M.S Livingston y E.O Lawrence (por este motivo, este último recibió en 1939 el premio Nobel) y se utiliza para acelerar partículas hasta conseguir que tengan una energía cinética muy elevada. Estas partículas con alta energía son de gran utilidad en el ámbito de la física nuclear, pues, por ejemplo, se usan como proyectiles para bombardear núcleos atómicos y deducir la estructura de los mismos, para producir materiales radiactivos, con fines médicos, etc.

La figura-7 muestra un dibujo muy esquemático de un ciclotrón. Consta de dos cámaras metálicas huecas con forma de semicírculo. Estas cámaras se llaman "des" (D) a causa de su forma y tienen los bordes de sus diámetros paralelos ligeramente separados. Están contenidas en una cámara de vacío para que las partículas que viajen por ellas no sean dispersadas en choques con moléculas de los gases que forman el aire. Sobre las "des" actúa un campo magnético uniforme y perpendicular, generado por un potente electroimán, y entre ambas se aplica un campo eléctrico cuyo sentido se va alternando de forma que en todo instante la fuerza actúe en el sentido del movimiento de las partículas. (El campo eléctrico en el interior de las "des" es 0).

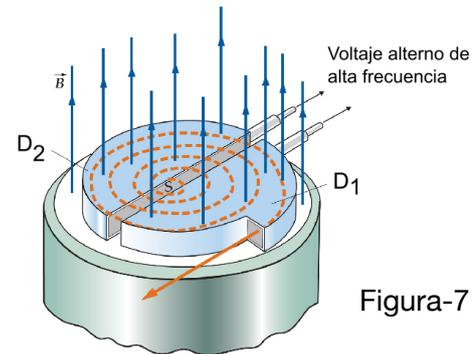


Figura-7

Desde una fuente de iones "S", situada cerca del centro del campo magnético, las partículas cargadas se inyectan al ciclotrón inicialmente a una velocidad moderada. La fuerza magnética les proporciona una aceleración normal y, por lo tanto, un movimiento circular por una de las "des". Al salir de ahí, se les aplica el campo eléctrico que acelera a las partículas y las lleva a la otra mitad del ciclotrón a una velocidad superior. A esa velocidad recorren otra semicircunferencia de radio mayor que la primera y vuelven a acceder a la zona entre las "des", donde se les aplica de nuevo el campo eléctrico (ahora en sentido contrario al anterior), que las vuelve a acelerar. Este proceso se repite una y otra vez hasta que las partículas salen finalmente del ciclotrón a una velocidad muy elevada, tras haber realizado en el ciclotrón del orden de 50 a 100 revoluciones.

El funcionamiento del ciclotrón se basa en el hecho de que el período de movimiento de una partícula cargada en el interior de un campo magnético uniforme es independiente de la velocidad de la partícula (ver III_II.7)

Obviamente, para conseguir este resultado es necesario que el sentido del campo eléctrico que se aplica a los iones cuando van de una a otra "D" coincida con el de su movimiento. Cuando las partículas tienen velocidades no excesivamente elevadas esto es bastante sencillo

de conseguir. Hay que disponer un campo eléctrico alterno que invierta su valor al cabo de intervalos de tiempo iguales al tiempo necesario para que el ion realice una semicircunferencia con esa rapidez angular.

La energía cinética de una partícula que emerge del ciclotrón puede calcularse mediante la ecuación III_II.6, sustituyendo R por el valor máximo del radio de las "des" y despejando el valor de la velocidad.

5. Campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida. Ley de Biot y Savart.

El resultado de la experiencia de Oersted indica que el campo magnético producido por una corriente rectilínea es perpendicular a dicha corriente, ya que la brújula se coloca perpendicular al cable en todas las experiencias. Además, el magnetismo natural muestra que las líneas del campo magnético (tangentes al vector inducción magnética, \vec{B} , en cada punto) son cerradas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la geometría de la situación, todo indica que las líneas del campo son circunferencias con centro en el conductor y contenidas en planos perpendiculares al mismo.

Para comprobar que esto es así, se puede hacer circular una corriente eléctrica por un hilo conductor rectilíneo situado verticalmente y colocar en un plano horizontal cerca del hilo, pequeños imanes testigo o agujas imantadas que puedan girar libremente. También se puede espolvorear limaduras de hierro sobre una cartulina atravesada por un cable por el que circule una corriente de intensidad elevada.

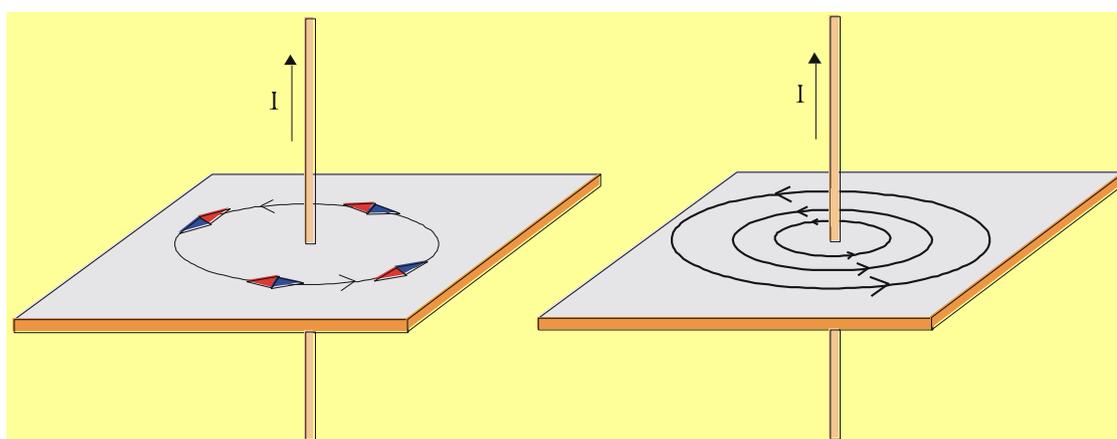


Figura-8

Ambos procedimientos confirman la hipótesis, ya que tanto las agujas, como las limaduras, quedan efectivamente dispuestas en círculos concéntricos alrededor del conductor (ver figura -8)

Para conocer el sentido de las líneas del campo magnético producido por una corriente eléctrica rectilínea podemos utilizar la regla de la mano derecha: sujetando el alambre con la mano derecha de forma que el dedo pulgar señale en el sentido de la corriente, los demás dedos curvados dan el sentido del campo.

El valor de la intensidad del campo magnético en un punto P a una distancia r del conductor, cabe suponer, que aumente con la intensidad de corriente I que circula por el conductor y

disminuya con la distancia r . Además, como las fuerzas magnéticas se ejercen a distancia, se entiende que el campo magnético se transmite por el espacio por lo que, es de esperar, que el medio que pueble dicho espacio (aire, agua, etc, o el vacío) también tendrá también influencia en el valor de la inducción magnética existente en un punto dado del mismo.

Biot y Savart obtuvieron la siguiente expresión para calcular el módulo del vector inducción correspondiente al campo magnético producido por un conductor rectilíneo e indefinido:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad \text{III_II.14}$$

siendo μ la permeabilidad magnética del medio.

Si estamos en el vacío, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$

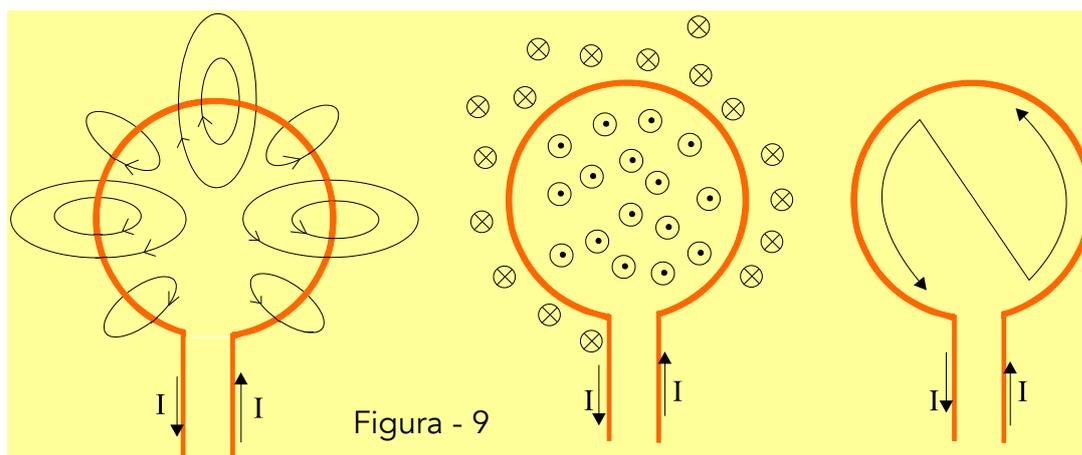
6. Campo magnético creado por una espira y por un solenoide.

Las conclusiones obtenidas acerca del cálculo del campo magnético creado por uno o varios conductores rectilíneos servirán ahora como punto de partida para estudiar campos magnéticos producidos por otras corrientes de forma más complicada, no rectilíneas. En primer lugar nos detendremos brevemente en analizar cuál puede ser el interés de esto.

En el caso del campo magnético creado por una corriente eléctrica rectilínea hemos visto que la inducción magnética en un punto era directamente proporcional al valor de la intensidad de la corriente. Ello hace que una forma de aumentar el valor del campo magnético en un punto dado sea aumentando el valor de la intensidad de la corriente que genera dicho campo. Sin embargo, podemos pensar también en otros procedimientos.

Podemos conseguirlo sin más que doblar el cable dándole una forma circular (espira) o mejor aún, arrollándolo como si fuese un muelle de muchos anillos (solenoides) para que así todo el cable se encuentre más cerca del punto considerado.

Para dibujar las líneas del campo magnético creado por una espira circular, se puede imaginar a dicha espira dividida en pequeños tramos casi rectilíneos. Las líneas del campo creado por cada uno de estos tramos de conductor se dibujan aplicando los resultados del apartado anterior y así se obtiene la consecuencia lógica de que la densidad de líneas del campo magnético (y por tanto la inducción magnética) es mayor en el interior y menor en el exterior de la espira. También se ve que en el plano que contiene a la espira, el campo magnético en su interior es perpendicular a ella y se dirige en un determinado sentido (por ejemplo, hacia



nosotros), mientras el campo magnético en el exterior también es perpendicular a la espira y se dirige en el sentido opuesto.

Comparando esta disposición del campo magnético producido por una espira con la que tienen los imanes naturales, se observa que una cara de la espira (por la que, dibujada sobre el papel, el campo magnético se dirige hacia nosotros) actúa como el polo norte de un imán, pues por ahí salen las líneas del campo magnético. Del mismo modo, la cara opuesta, por la que entran las líneas del campo, actúa como el polo sur de un imán. Una regla útil para establecer de modo rápido cuál es la cara N y la cara S de una espira consiste en dibujar una letra N o una letra S de modo que los extremos de estas letras acaben en puntas de flecha. La letra cuyas puntas de flecha coincidan con el sentido de la corriente indica qué polo es la cara de la espira que estamos mirando. De acuerdo con todo ello, en las figuras anteriores la cara de la espira que nosotros vemos actúa como polo N.

Si mirásemos la misma espira por el otro lado, veríamos la cara que actúa como polo S. Las figuras correspondientes en ese caso serían las siguientes:

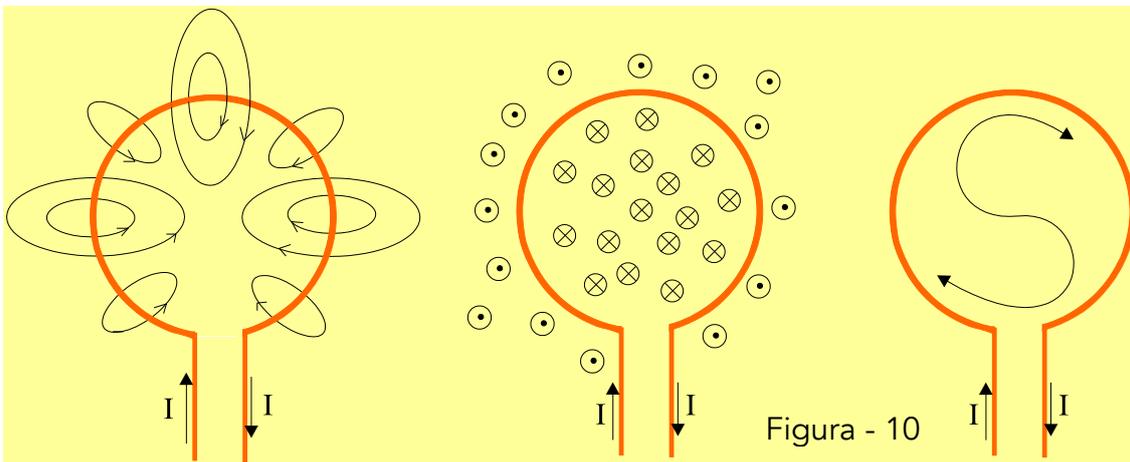


Figura - 10

A una espira por la que circula una corriente eléctrica se le pueden asignar polos magnéticos exactamente igual que se le atribuyen a un imán natural.

El cálculo del campo magnético \vec{B} creado por una espira es bastante más complicado que en el caso de una corriente rectilínea. Pero existe un punto, justamente en el centro de la espira, donde tiene especial interés poder evaluarlo y donde además no resulta muy difícil hacerlo porque goza de una simetría de la que carece cualquier otro lugar.

La experiencia y un desarrollo formal que aquí omitiremos demuestran que, para el centro de una espira de radio R recorrida por una corriente eléctrica de intensidad I constante, el módulo del vector campo magnético en ese punto viene dado por:

$$B = \frac{\mu I}{2R}$$

III_II.15

Si se juntaran varias espiras y por todas ellas circulara una corriente eléctrica en el mismo sentido, en la zona interior el campo magnético sería muy intenso y prácticamente uniforme. Una forma de conseguir este efecto es arrollar un conductor en forma de hélice apretada

(equivalente a la asociación de muchas espiras). El dispositivo obtenido se llama **solenoides** (o también bobina).

En la figura-11 se representa, de manera esquemática, el corte longitudinal de una bobina. Para facilitar su interpretación se han dibujado las espiras exageradamente separadas unas de otras. Hay que tener presente que los puntos y las cruces nos indican el sentido de la corriente que circula por la espira; asimismo podemos visualizar las líneas de fuerza magnéticas (discontinuas) en el interior del solenoide:

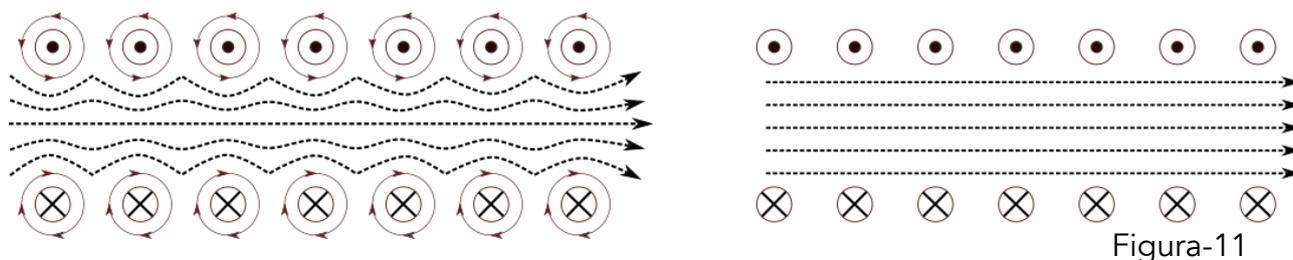


Figura-11

Como vemos, las contribuciones al campo magnético de cada una de las espiras se refuerzan y proporcionan un campo magnético de líneas prácticamente paralelas y equidistantes, por lo tanto, casi uniforme. Además, en la zona que queda entre las espiras el campo es casi nulo (las contribuciones de espiras contiguas son opuestas) y en el exterior del solenoide el campo es mucho más débil. De este modo, el solenoide genera un campo magnético cuya distribución de líneas es muy similar a la de un imán rectangular en el exterior y también en el interior, pero con la ventaja de que ahí dentro, donde el campo es uniforme y de intensidad controlable, se tiene acceso.

En puntos del interior de un solenoide suficientemente alejados de los extremos, es lógico pensar que el campo magnético se pueda evaluar como una suma de las contribuciones aportadas por cada espira del arrollamiento. Por lo tanto, \vec{B} debería ser proporcional a la intensidad de corriente que circula por las espiras I , a la permeabilidad magnética del medio μ y a la densidad lineal de espiras, es decir, el número de espiras por unidad de longitud N/ℓ (donde N es el número de espiras y ℓ es la longitud del solenoide). Un desarrollo formal que omitiremos aquí y las experiencias realizadas al efecto, demuestran que, efectivamente, la inducción magnética producida por un solenoide en el interior viene dada por la siguiente expresión:

$$B = \frac{\mu IN}{\ell} \quad \text{III_II.16}$$

Este valor de B sólo corresponde a puntos del interior del solenoide alejados de los extremos. En estos extremos, las líneas salen divergiendo y, por lo tanto, la intensidad del campo magnético es menor (justamente la mitad).

En el exterior del solenoide, el cálculo del campo magnético es bastante más complicado, y tiene un valor diferente en cada punto y, de modo general, decrece con la distancia.

Como el campo magnético depende del medio, con objeto de aumentar aún más el valor del campo magnético producido por un solenoide se puede incluir en su interior un material como

puede ser hierro, de forma que se incremente la permeabilidad magnética. El resultado es un dispositivo denominado electroimán.

7. Fuerza magnética entre dos corrientes rectilíneas e indefinidas.

Unas de las experiencias que confirman que el magnetismo tiene su origen en cargas eléctricas en movimiento es el de hacer circular corrientes por conductores paralelos y observar el efecto de atracción o repulsión que se produce entre ellos.

Consideremos dos conductores rectilíneos muy largos y paralelos, de longitudes L_1 y L_2 y por los que circulan corrientes de intensidades I_1 e I_2 , respectivamente y separados una distancia a . Como por el conductor rectilíneo L_1 circula una corriente de intensidad I_1 , dicho conductor crea un campo magnético cuya intensidad en un punto situado a una cierta distancia a viene dada, según III_II.14, por:

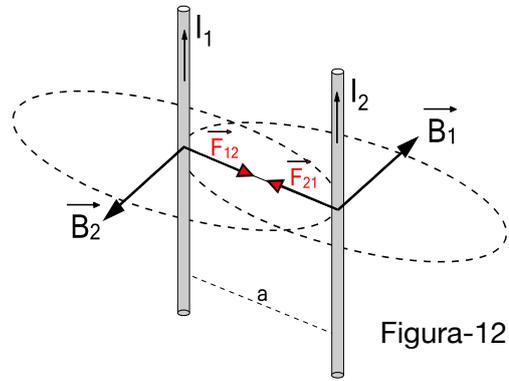


Figura-12

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \tag{III_II.17}$$

cuya dirección es tangente a la circunferencia de radio a y cuyo sentido obedece la regla de la mano derecha.

Este campo magnético ejerce una fuerza sobre la corriente I_2 que circula por el conductor L_2 cuyo valor viene dado por la primera ley de Laplace (III_II.12):

$$\vec{F}_{21} = I_2 (\vec{\ell}_2 \times \vec{B}_1) \tag{III_II.18}$$

cuya dirección es perpendicular tanto al vector inducción magnética como al vector $\vec{\ell}_2$, que a su vez son perpendiculares entre sí, y su sentido es hacia el conductor L_1 .

Y en consecuencia, el módulo de esa fuerza es:

$$F_{21} = I_2 L_2 B_1 \tag{III_II.19}$$

si sustituimos el valor del campo obtenido en III_II.17 en III_II.19, llegamos a:

$$F_{21} = I_2 L_2 \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \tag{III_II.20}$$

El valor de la **fuerza por unidad de longitud** para ese conductor es:

$$f_{21} = \frac{F_{21}}{L_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \text{ (N/m)} \tag{III_II.21}$$

Resulta fácil deducir que, por cada unidad de longitud del conductor L_1 , actúa otra fuerza cuyo módulo y dirección coinciden con la expresada en III_II.21, pero de sentido opuesto. Ambas fuerzas cumplen, por tanto, la tercera Ley de Newton.

El resultado obtenido indica que dos corrientes rectilíneas paralelas del mismo sentido se atraen con una fuerza que, por unidad de longitud, es directamente proporcional al producto de las intensidades e inversamente proporcional a la distancia que las separa.

Si las corrientes tienen sentidos opuestos, ¿qué situación nos encontraríamos?

7.1. Definición de amperio.

Hasta el pasado 20 de mayo de 2019, el amperio (unidad fundamental de la intensidad de corriente eléctrica en el sistema Internacional de unidades) se definía en función de la atracción o repulsión entre corrientes paralelas:

El amperio es la intensidad de una corriente constante que, manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de 1 metro uno del otro, en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.

Si en la expresión III_II.21 despejamos la permeabilidad magnética y sustituimos los valores de la definición de amperio, se obtiene un valor de $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A²

La nueva definición del amperio se realiza a partir de la carga elemental e ; esta nueva definición permitirá reducir la incertidumbre en las constantes eléctricas.

8. Ley de Ampère.

La fuente fundamental de los campos magnéticos es la corriente eléctrica. Las líneas de los campos magnéticos forman bucles cerrados, a diferencia de las líneas del campo eléctrico, que empiezan y terminan en las cargas eléctricas.

Existe una ecuación análoga a la ley de Gauss, para el campo magnético, llamada **Ley de Ampère**. El científico francés Ampère, inspirándose en la ley de Biot y Savart, estableció la relación que existe entre el campo magnético y la intensidad de corriente que circula por un conductor, sea cual sea la forma de éste.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I \quad \text{III_II.22}$$

La Ley de Ampère nos indica que la circulación¹ de un campo magnético en una línea cerrada es directamente proporcional al producto de la permeabilidad magnética del medio por la suma algebraica (positivas y negativas) de las intensidades de corriente que atraviesan el plano

¹ Dado un campo vectorial, \vec{V} , la integral curvilínea del campo vectorial a lo largo de una curva cerrada, circulación de \vec{V} , se define como $\oint_L \vec{V} \cdot d\vec{\ell}$, siendo $d\vec{\ell}$, un elemento lineal de la curva.

definido por la línea cerrada. Se toma como positiva una intensidad de corriente que atraviesa la superficie en el sentido en que avanza un tornillo de rosca derecha al rotarlo en el sentido en que está orientado la línea cerrada.

Esta ecuación es válida para cualquier "camino" que encierre a la corriente rectilínea y también lo es para cualquier forma de la corriente, no solo rectilínea, con la única condición de que sea estacionaria, es decir que no varíe con el tiempo.

Como se puede ver, la circulación del campo magnético no es cero, y como consecuencia el campo magnético **NO es conservativo**, y por consiguiente no podemos asociar al campo magnético un potencial escalar.

La ley de Ampère se suele utilizar para determinar el campo magnético en situaciones de alto grado de simetría.

Podemos aplicar la Ley de Ampère, para calcular el valor de la intensidad del campo magnético creado por un conductor rectilíneo e indefinido a una distancia r del conductor. Las líneas de campo magnético son circunferencias, con centro en el conductor, situadas en un plano perpendicular al mismo (ver figura - 13); si sobre una de estas líneas de radio r , tomamos un elemento $d\vec{\ell}$, y calculamos el producto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$, obtenemos el producto de sus módulos, ya que ambos vectores son paralelos, y en consecuencia la circulación del campo magnético a través de la línea cerrada tiene el siguiente valor:

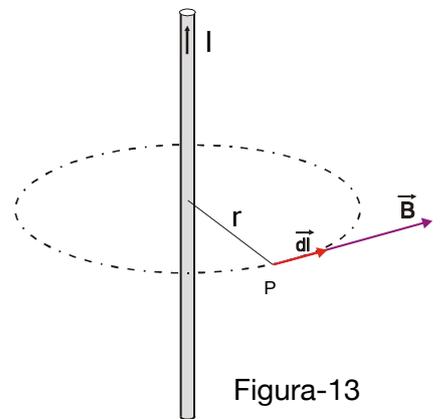


Figura-13

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = B \int d\ell = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} 2\pi r = \mu_0 I$$

III_II.23

Calcularemos la expresión del campo magnético en el interior de un solenoide.

En la figura-14 se representa un corte de un solenoide, en el que se ha elegido una línea cerrada a,b,c,d; teniendo en cuenta que en el exterior del solenoide el campo magnético es despreciable, y que en los tramos ab y cd el vector campo magnético y el vector $d\vec{\ell}$ son perpendiculares, el único tramo en donde la integral no es nula resulta ser el ad por lo que:

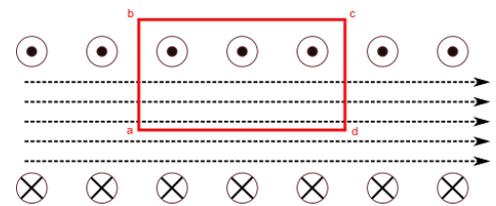


Figura-14

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I \rightarrow B l_{ad} = \mu_0 N_{ad} I$$

Si tenemos en cuenta que $\frac{N_{ad}}{\ell_{ad}}$ es el número de espiras por unidad de longitud y que, por tanto, coincide con N/l en donde N es el número total de espiras y l la longitud del solenoide, se obtiene:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

que coincide con la ecuación III_II.16.

9. Flujo magnético.

Podemos definir el concepto de flujo magnético como:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{III_II.24}$$

La unidad de flujo magnético es el Weber (Wb). Un weber es el flujo de un campo magnético uniforme de un Tesla a través de una superficie de un metro cuadrado colocada perpendicularmente a la dirección de las líneas de fuerza.

$$\text{Wb} = \text{T m}^2 = \text{kg m}^2 \text{s}^{-1} \text{C}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{A}^{-1}$$

Por lo tanto, otra forma de expresar la intensidad del campo magnético es Wb/m^2 .

El flujo nos informa sobre el número de líneas de fuerza que atraviesan una determinada superficie.

10. Propiedades del campo magnético estacionario. Comparación con el electrostático.

A lo largo del tema hemos ido presentando las principales características del campo magnético; vamos a recordarlas ahora al tiempo que las comparamos con las del campo electrostático:

- ❖ La fuerza que ejerce el campo electrostático sobre una carga depende solamente de la intensidad de dicho campo y del valor de la carga; en cambio para el campo magnético depende de la intensidad del campo magnético, del valor de la carga y de la velocidad con que se mueve dicha carga.
- ❖ El campo electrostático realiza trabajo si una carga se desplaza entre dos puntos que estén a distinto potencial; en cambio el campo magnético no realiza trabajo puesto que la fuerza magnética sobre una carga es perpendicular a la velocidad (o al desplazamiento), en cuyo caso el trabajo es nulo.
- ❖ Como consecuencia del punto anterior, si una carga se desplaza entre dos puntos de un campo eléctrico que estén a diferente potencial, su energía cinética varía; por el contrario, la energía cinética de una carga que se mueve en un campo magnético permanece constante.
- ❖ El hecho de que el campo electrostático sea conservativo, permite asociar a la carga una energía potencial electrostática; sin embargo no tiene sentido hablar de la energía potencial magnética asociada a una carga puesto que el campo magnético no es conservativo.

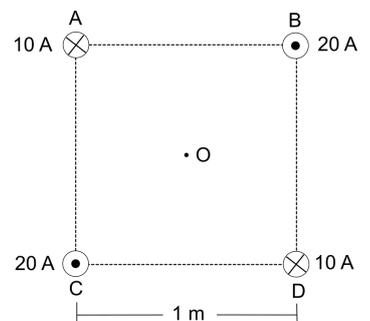
- ⊗ El campo electrostático creado por una carga puntual en reposo tiene simetría esférica en torno a la carga, en cambio el campo magnético tiene simetría de rotación respecto de la dirección de movimiento de la carga.
- ⊗ Las líneas del campo electrostático son abiertas mientras que las del campo magnético son cerradas.
- ⊗ La interacción magnética entre dos cargas que se mueven con velocidades pequeñas en comparación con la de la luz es mucho más débil que la eléctrica.

11. Ejercicios y actividades.

1. ¿Por qué no sería correcto hablar de líneas magnéticas de fuerza?
2. Un determinado ciclotrón tiene un campo magnético de 1,8 T y está proyectado para acelerar protones hasta 25 MeV. (a) ¿Cuál es la frecuencia del ciclotrón? (b) ¿Cuál deberá ser el radio mínimo del imán para obtener una energía de salida de 25 MeV- ¿Si se aplica un potencial alternativo a las des con un valor máximo de 50 kV, ¿cuántas vueltas deberán realizar los protones antes de emerger con la energía de 25 MeV? Datos: carga del electrón: $1,6 \cdot 10^{-19}$ C; masa del protón: $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg
3. Desde valores negativos del eje X se mueve a lo largo del mismo, un electrón a velocidad constante $\vec{v} = 1,0 \cdot 10^8 \vec{i}$ m/s. Al llegar a $x = 0$ se activa un campo magnético uniforme perpendicular al plano XY, entrante y de módulo 0,1 T, $\vec{B} = 0,10 \vec{k}$ T. por el que el electrón describe media circunferencia y sale de la región del campo magnético.
 - a. ¿qué distancia hay entre el punto en el que el electrón entra y el punto en el que sale del campo magnético? Realiza un esquema de la trayectoria del electrón.
 - b. Determina el tiempo que tardará el electrón en recorrer esa media circunferencia.
 - c. ¿cuál sería el campo eléctrico que habría que aplicar a partir de $x = 0$ para que el electrón no alterase su velocidad?

Datos: carga del electrón: $1,6 \cdot 10^{-19}$ C; masa del electrón: $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg

4. Cuatro conductores muy largos y paralelos transportan intensidades de corriente de valor 10 A en un sentido de la corriente y 20 A en sentido contrario. La disposición de los conductores y sus sentidos de circulación de la corriente vienen indicados en la figura. El lado del cuadrado mide 1,0 m.



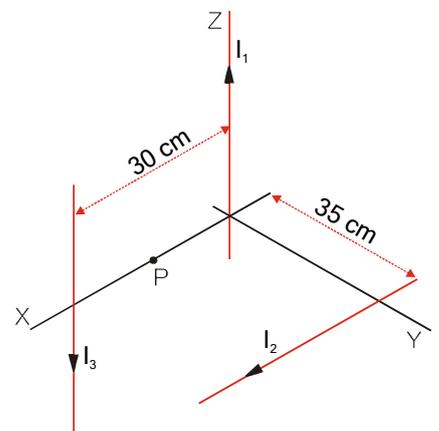
- a. Calcula el valor del vector campo magnético producido por los cuatro conductores en O, el centro del cuadrado.
- b. Calcula el valor del vector campo magnético producido por los cuatro conductores en O si las intensidades de las corrientes que circulan son $I_A = I_B = 10$ A, $I_C = 20$ A e $I_D = 0$ A.

Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ N·A⁻²

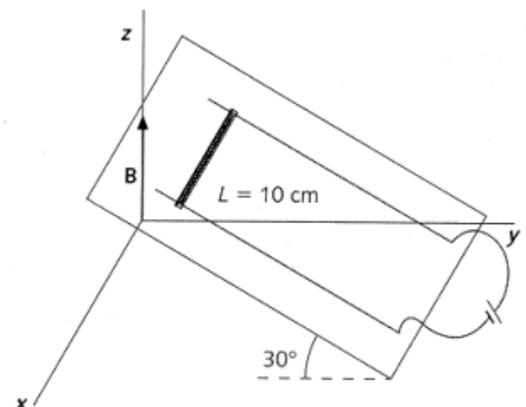
5. Una partícula A cargada positivamente se mueve con velocidad v en la dirección x positiva. Entra en una región en donde está definido un campo magnético uniforme de magnitud B dirigido hacia el eje z negativo. Se quiere equilibrar la fuerza magnética con un campo eléctrico de modo que la partícula se mueva a lo largo de una línea recta. ¿hacia dónde debe dirigirse el campo eléctrico?
6. Por dos conductores coaxiales circulan dos corrientes con sentidos contrarios: la intensidad de la corriente que circula por el conductor interior es de $5,0\text{ A}$ y la intensidad de corriente del conductor exterior se desconoce. Calcula la intensidad de este conductor sabiendo que a 35 cm del eje de ambos conductores, el valor del campo magnético es de $2,3 \cdot 10^{-8}\text{ T}$. y que la intensidad que circula por el conductor interior es superior a la exterior. Dato: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$
7. Un solenoide de 10 cm está formado por 250 espiras. a) Halla el valor de la corriente necesaria para que en su interior se genere un campo magnético de $0,025\text{ T}$. b) Determina el valor del campo si se mantiene la misma corriente, pero se introduce un núcleo de hierro dulce en su interior. Dato: $\mu' = 5000$
8. Una varilla de 200 gramos y 40 cm de longitud es recorrida por una intensidad de $2,0\text{ A}$. Si la varilla está apoyada sobre una superficie horizontal de coeficiente de rozamiento $0,30$, calcula el valor y la dirección del campo magnético para que comience a deslizar. Dato: $g = 10\text{ m/s}^2$.

9. Se acelera un protón a través de una diferencia de potencial de 10^5 voltios. A continuación, el protón entra perpendicularmente a un campo magnético, recorriendo una trayectoria circular de 30 cm de radio. Calcula el valor del campo. Datos: masa del protón: $1,67 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$; carga del protón: $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$

10. Determina el vector campo magnético en el punto P de la figura, sabiendo que éste se halla justo en el medio de los conductores por los que circula I_1 e I_3 . Datos: $I_1 = 1,0\text{ A}$, $I_2 = 0,50\text{ A}$ e $I_3 = 2,0\text{ A}$; $\mu_0 = 4,0\pi \cdot 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$



11. Una varilla conductora de 10 gramos de masa puede deslizar sobre dos raíles conductores que forman un plano inclinado de 30° respecto de la horizontal, como se indica en la figura. Existe un campo magnético uniforme de $1,0\text{ T}$ vertical hacia arriba. La varilla se mantiene paralela al eje Ox y la distancia entre los raíles es de 10 cm . Suponiendo despreciable el rozamiento, determinar el valor de la corriente que ha de suministrar la batería para que la varilla no se mueva. Dato: $g = 9,8\text{ m/s}^2$



12. Un hilo de 50 cm de longitud está sobre el eje Y y transporta una corriente de 1,0 A en la dirección positiva del eje Y. El hilo se encuentra en el seno de un campo magnético $\vec{B} = 0,27\vec{i} - 0,4\vec{j} + 0,5\vec{k}$ T, ¿cuál es la fuerza que actúa sobre el hilo?
13. Un electrón entra con velocidad constante, $\vec{v} = 10\vec{j}$ m/s, en una región del espacio en la que existe un campo eléctrico uniforme, $\vec{E} = 20\vec{k}$ N/C, y un campo magnético uniforme $\vec{B} = B_0\vec{i}$ T a) Dibuja las fuerzas que actúan sobre el electrón (dirección y sentido) en el instante en que entra en la región en que existen el campo eléctrico y el magnético. b) Calcula el valor de B_0 para que el movimiento del electrón sea rectilíneo y uniforme. Considera despreciable el valor del campo gravitatorio.

Soluciones:

- | | |
|---|--|
| 1. La fuerza magnética es perpendicular al campo magnético. | 6. 4,9(6) A |
| 2. a) 27 MHz; b) 40 cm; c) 250 vueltas. | 7. a) 8,0 A; b) 125 T. |
| 3. a) 11 mm; b) 180 ps; c) $\vec{E} = 1,0 \cdot 10^7 \vec{j}$ N/C | 8. 0,75 T; perpendicular a la superficie. |
| 4. a) Cero; b) $4 \cdot 10^{-6}$ T, hacia el centro del lado AC | 9. 0,2 T |
| 5. Hacia la parte negativa del eje Y. | 10. $\vec{B} = (2/5)10^{-5} \vec{j} - (1/35)10^{-5} \vec{k}$ |
| | 11. 0,57 A |
| | 12. $\vec{F} = 0,25\vec{i} - 0,135\vec{k}$ N |
| | 13. 2 T |

Bibliografía:

Tipler, Paul A. Física Editorial Reverté SA
 Física 2º Bachillerato Carrascosa, Martínez y Alonso
 Física universitaria. Young y Freedman. 12 Ed.