

TEMA 4. CAMPO MAGNÉTICO

1. Origen del campo magnético
2. Descripción del campo magnético
3. Campo magnético creado por una carga en movimiento
4. Campo magnético creado por una corriente eléctrica rectilínea e indefinida
5. Fuerza magnética sobre cargas puntuales en movimiento: Fuerza de Lorentz
6. Movimiento de cargas puntuales en campos magnéticos
7. Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea
8. Fuerza magnética entre corrientes rectilíneas



1. ORIGEN DEL CAMPO MAGNÉTICO

El fenómeno del magnetismo es conocido desde hace más de 2000 años. Se descubrió por primera vez en Magnesia (Asia Menor). Algunos cuerpos naturales como la magnetita (Fe_3O_4), presentan la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro. A tales cuerpos se les da el nombre de **imanes naturales**, y la propiedad que tienen recibe el nombre de **magnetismo**.

Además de los imanes naturales, existen otras sustancias, como el hierro, el cobalto y el níquel, que pueden adquirir el magnetismo de una manera artificial. A estos cuerpos se les da el nombre de **imanes artificiales**.

Los imanes, tanto naturales como artificiales, tienen las siguientes propiedades:

- Todo imán presenta la máxima atracción o repulsión en los extremos, que reciben el nombre de **polos magnéticos**.
- Los polos magnéticos reciben los nombres de Norte y Sur porque se orienta según los polos magnéticos de la Tierra, que es un imán natural.
- No existen los monopolos magnéticos, es decir, los polos magnéticos son inseparables por lo que un imán siempre presenta dos polos (dipolos) por muy pequeño que sea.

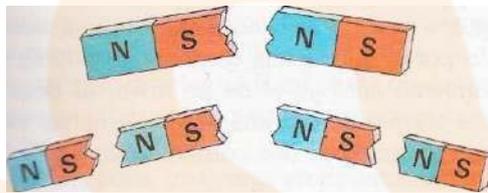


Figura 4.1

- Los polos del mismo tipo se repelen y los de distinto nombre se atraen.
- El valor de la fuerza de atracción o repulsión entre imanes decrece con la distancia de separación entre ellos.

El origen del magnetismo empezó a ser bien conocido en el transcurso de los siglos XVIII y XIX. Así, en 1819, el científico danés Christian Oersted descubrió que **las corrientes eléctricas creaban campos magnéticos a su alrededor**. Su experiencia consistió en observar que al acercar una aguja imantada a una corriente eléctrica, aquella dejaba de orientarse hacia el polo Norte para situarse perpendicularmente a la corriente. A partir de aquí, se dedujo que las corrientes eléctricas producen el mismo efecto que los imanes.

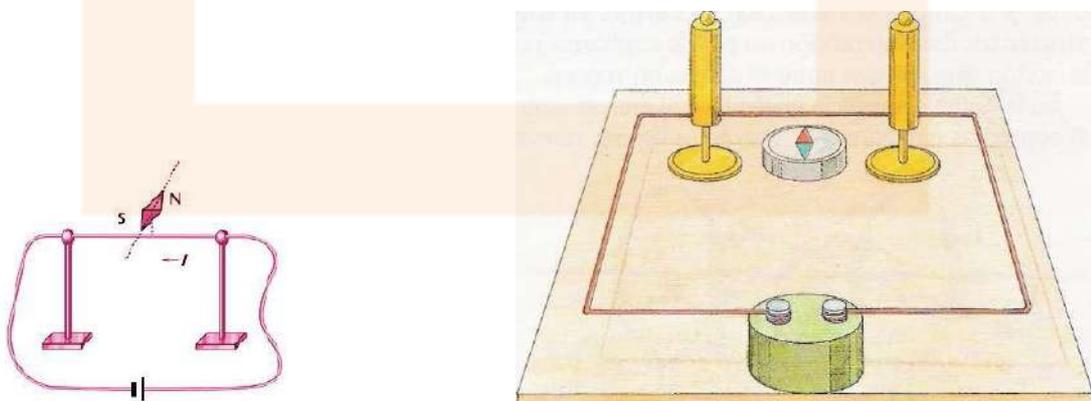
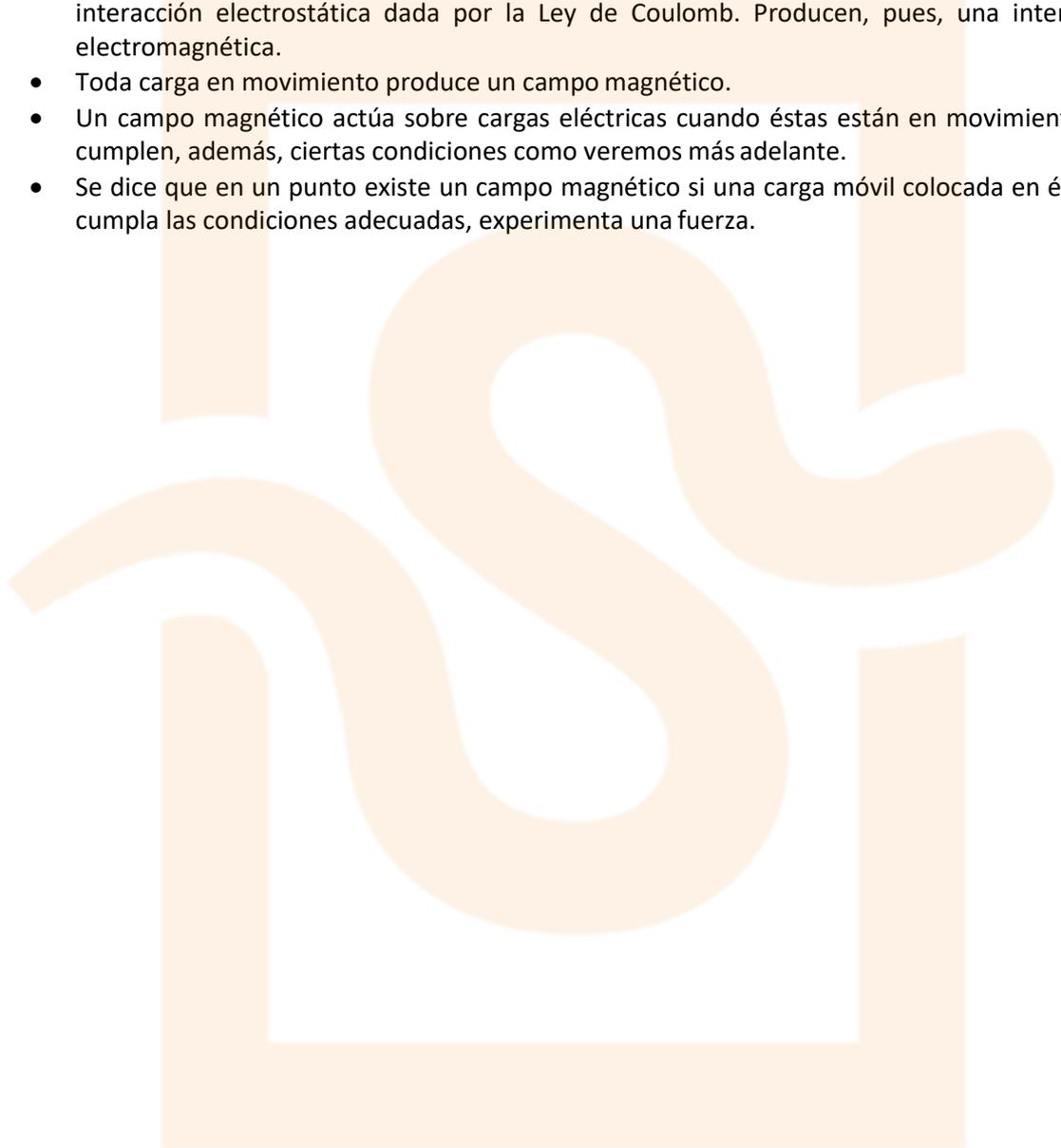


Figura 4.2 Experiencia de Oersted

Doce años más tarde, Michael Faraday observó el efecto recíproco: aproximando o alejando un imán a un conductor, en este se origina una corriente eléctrica. Ambas experiencias tienen el mismo fundamento: **las cargas eléctricas en movimiento producen fuerzas magnéticas**. El magnetismo es, pues, una consecuencia de la electricidad y del movimiento.

Posteriormente, Ampère, con sus teorías basadas en las experiencias de Oersted y Faraday, asentó los fundamentos del electromagnetismo. De todo lo dicho se deduce que el electromagnetismo se basa en una serie de puntos básicos:

- Cargas eléctricas en movimiento producen una interacción de tipo magnético, además de la interacción electrostática dada por la Ley de Coulomb. Producen, pues, una interacción electromagnética.
- Toda carga en movimiento produce un campo magnético.
- Un campo magnético actúa sobre cargas eléctricas cuando éstas están en movimiento y se cumplen, además, ciertas condiciones como veremos más adelante.
- Se dice que en un punto existe un campo magnético si una carga móvil colocada en él y que cumpla las condiciones adecuadas, experimenta una fuerza.



2. DESCRIPCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO

El campo magnético es la región del espacio en la que se pone de manifiesto la fuerza magnética. Por tanto, existirá un campo magnético en cualquier punto de la región que hay en el entorno de un imán, de una carga eléctrica en movimiento o de una corriente eléctrica. Para comprobarlo, bastaría con colocar en dicha región otro imán, limaduras de hierro, una aguja imantada, una corriente eléctrica o una carga en movimiento, y observaríamos la acción de una fuerza sobre cualquiera de ellos.

El campo magnético es un campo vectorial de fuerzas y por tanto en cada punto viene caracterizado por el vector intensidad de campo, que en este caso recibe el nombre de **vector inducción magnética**, o simplemente **campo magnético**, y se representa por \vec{B} .

El vector campo magnético en cada punto se define como la fuerza que ejerce el campo sobre la unidad de carga positiva que se mueve con una unidad de velocidad en dirección perpendicular al campo en dicho punto. Su unidad en el S.I. es el tesla (T), en honor del científico de origen serbio Nikola Tesla.

Un **tesla** es la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que se mueve a 1 m/s en el interior del campo y perpendicularmente al mismo:

$$1\text{Tesla} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m} / \text{s}}$$

Otra unidad de campo magnético es el **Gauss (g)**:

$$1\text{ T} = 10^4\text{ g}$$

El campo magnético, como campo vectorial de fuerzas que es, se puede representar gráficamente por líneas de campo o líneas de fuerza que reciben el nombre de **líneas de inducción magnética**. La dirección del campo es tangente en cada punto a las líneas de inducción y tiene el mismo sentido que éstas. Además se construyen de modo que la densidad de líneas es mayor en aquellos puntos en donde el campo magnético es más intenso.

2.1 Líneas de fuerza del campo magnético de un imán rectangular

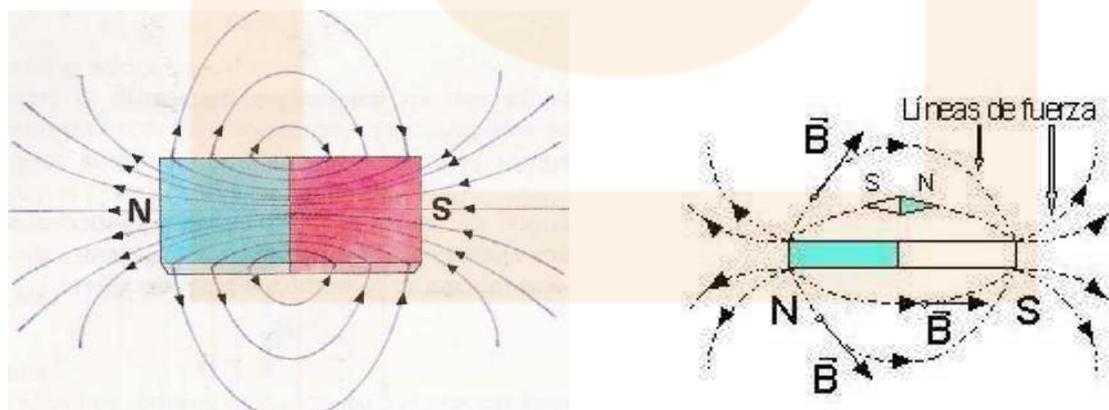


Figura 4.3

Líneas de inducción magnética del campo magnético de un imán

La tierra es un potente imán. El polo sur magnético se encuentra al norte de Canadá, aproximadamente a 1300 Km del polo norte geográfico. Por tanto, la brújula no apunta exactamente hacia el norte geográfico.

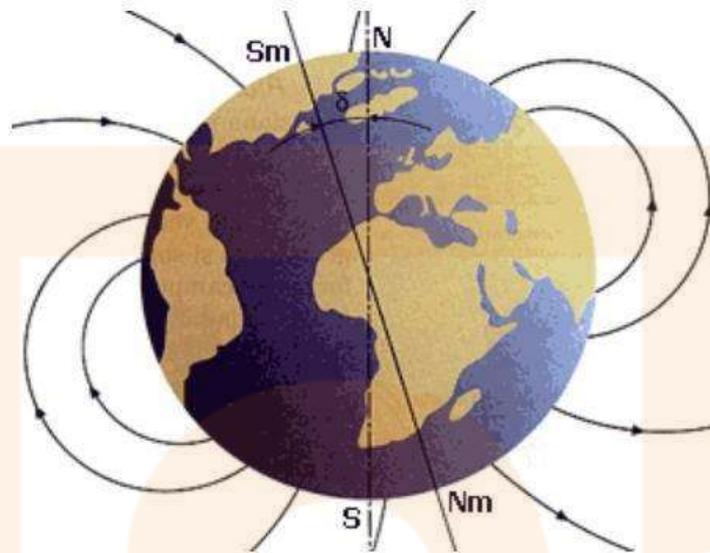


Figura 4.4
Líneas de inducción magnética del campo magnético terrestre

Observa que las líneas de fuerza son cerradas (a diferencia de las de los campos gravitatorio y eléctrico que son abiertas) y su densidad aumenta en las proximidades de los extremos del imán que es donde la intensidad del campo magnético es mayor. Observa también que las líneas de fuerza salen del polo norte y entran por el polo sur.

2.2 Líneas de fuerza de una corriente circular (espira circular)

Las líneas de inducción magnética del campo creado por una espira están representadas en la siguiente figura donde se puede observar que son líneas cerradas pudiendo decir que, al igual que un imán y según por donde se mire, la espira presenta su polo norte (por donde salen las líneas) o su polo sur (por donde entran las líneas).

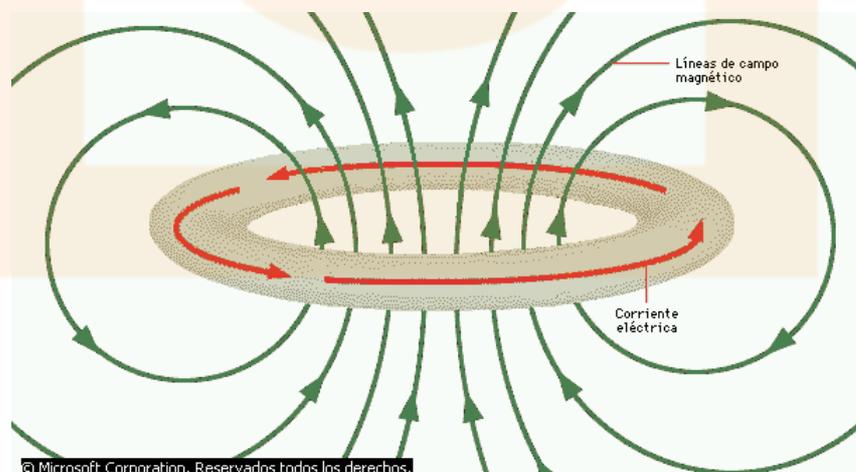


Figura 4.5
Líneas de campo de una corriente circular (espira circular)

Para saber qué cara de la espira es un polo N o un polo S, basta con seguir la regla que se indica en la siguiente figura:



Figura 4.6
Polos magnéticos de una espira circular

2.3 Líneas de fuerza de un campo uniforme

En el caso de que el campo magnético sea uniforme, las líneas de inducción son paralelas entre sí, igualmente espaciadas y todas del mismo sentido.

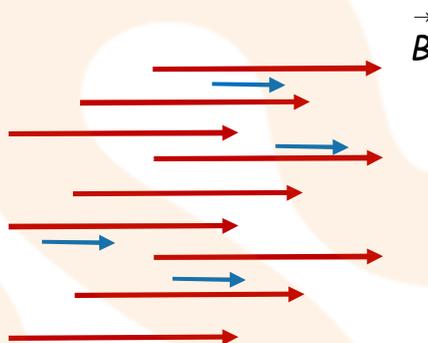
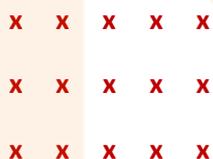
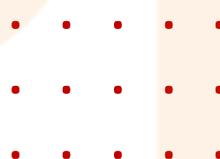


Figura 4.7
Líneas de inducción de un campo magnético uniforme

En ocasiones, se utilizan puntos o cruces para simbolizar un campo uniforme saliente o entrante al plano del papel, respectivamente.



Campo magnético entrante:
Dirección: eje z
Sentido: negativo



Campo magnético saliente:
Dirección: eje z
Sentido positivo

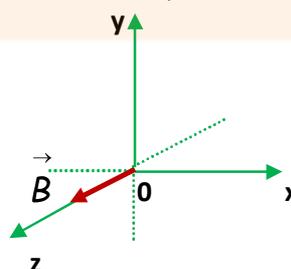
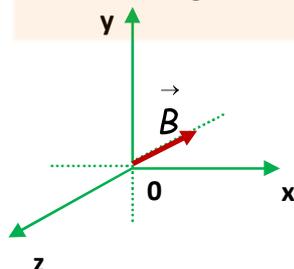


Figura 4.8
Líneas de inducción de un campo magnético uniforme

3. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CARGA EN MOVIMIENTO

El campo magnético \vec{B} que crea una carga puntual Q que se mueve con velocidad \vec{v} en un punto P que se encuentra a una distancia r de ella viene dado por la expresión:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{v} \times \vec{U}_r \quad [4.1]$$

Donde:

- \vec{r} es el vector que va de la carga fuente hasta el punto P
- \vec{U}_r es un vector unitario de la misma dirección y sentido que \vec{r}
- μ es una constante característica de cada medio llamada **permeabilidad magnética**

De la expresión anterior podemos deducir las siguientes consecuencias:

- El campo magnético que crea una carga puntual Q en un punto aumenta con el valor de la carga y con su velocidad, pero decrece con el cuadrado de la distancia que hay de la carga fuente a dicho punto.
- El campo magnético \vec{B} siempre es perpendicular a los vectores \vec{r} y \vec{v}
- Al igual que ocurría con el campo eléctrico el valor del campo magnético depende de las características del medio en el que se encuentren las cargas a través de la permeabilidad magnética μ aunque su comportamiento es diferente al de la constante eléctrica K , tal y como se explica a continuación.

La permeabilidad magnética μ no tiene su valor máximo en el vacío, y por tanto el campo magnético no es máximo en el vacío (recuerda que sí lo era el campo eléctrico). En el vacío la permeabilidad magnética vale:

$$\mu_0 = \mu (\text{vacío}) = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ UI}$$

El comportamiento magnético de la materia se establece por comparación con el vacío. Para ello se utiliza la **permeabilidad magnética relativa** μ_r . La permeabilidad magnética de un medio es el cociente entre su permeabilidad μ magnética y la del vacío μ_0 .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

- Destaquemos que la permeabilidad magnética relativa no tiene unidades.
- Observa que la permeabilidad magnética relativa del vacío vale 1 ($\mu_{r0} = 1$).
- Si la permeabilidad magnética relativa de un medio vale 1 ($\mu_r = 1$), este medio tiene la misma permeabilidad magnética que el vacío ($\mu = \mu_0$).
- Si la permeabilidad magnética relativa de un medio vale más de la unidad ($\mu_r > 1$), este medio tiene más permeabilidad magnética que el vacío ($\mu > \mu_0$).
- Si la permeabilidad magnética relativa de un medio vale menos de la unidad ($\mu_r < 1$), este medio tiene una permeabilidad magnética menor que la del vacío ($\mu < \mu_0$).

Respecto a la permeabilidad magnética, podemos distinguir tres tipos de sustancias o medios, cuyo comportamiento es muy diferente:

- ❖ **Sustancias diamagnéticas**, como el oro o la plata cuya permeabilidad magnética es ligeramente menor que la del vacío $\mu < \mu_0$ ($\mu_r < 1$) y por tanto el campo magnético en su interior es ligeramente menor al que existe en el vacío.
- ❖ **Sustancias paramagnéticas**, como el cromo o el manganeso cuya permeabilidad magnética es ligeramente mayor que la del vacío $\mu > \mu_0$ ($\mu_r > 1$) y por tanto el campo magnético en su interior es ligeramente superior al que existe en el vacío.
- ❖ **Sustancias ferromagnéticas**, como el hierro cuya permeabilidad magnética es mucho mayor que la del vacío $\mu \gg \mu_0$ ($\mu_r \gg 1$) y por tanto el campo magnético en su interior es muchísimo mayor al que existe en el vacío.



4. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA RECTILÍNEA E INDEFINIDA

Las líneas de fuerza o líneas de inducción magnética del campo magnético creado por una corriente rectilínea e indefinida son circunferencias concéntricas alrededor del conductor cuyo sentido viene determinado por la regla de la mano derecha: si se coge el conductor con la mano derecha de manera que el pulgar apunte en el sentido de la corriente, los demás dedos rodearán el conductor en el mismo sentido de giro que lo hacen las líneas de campo.

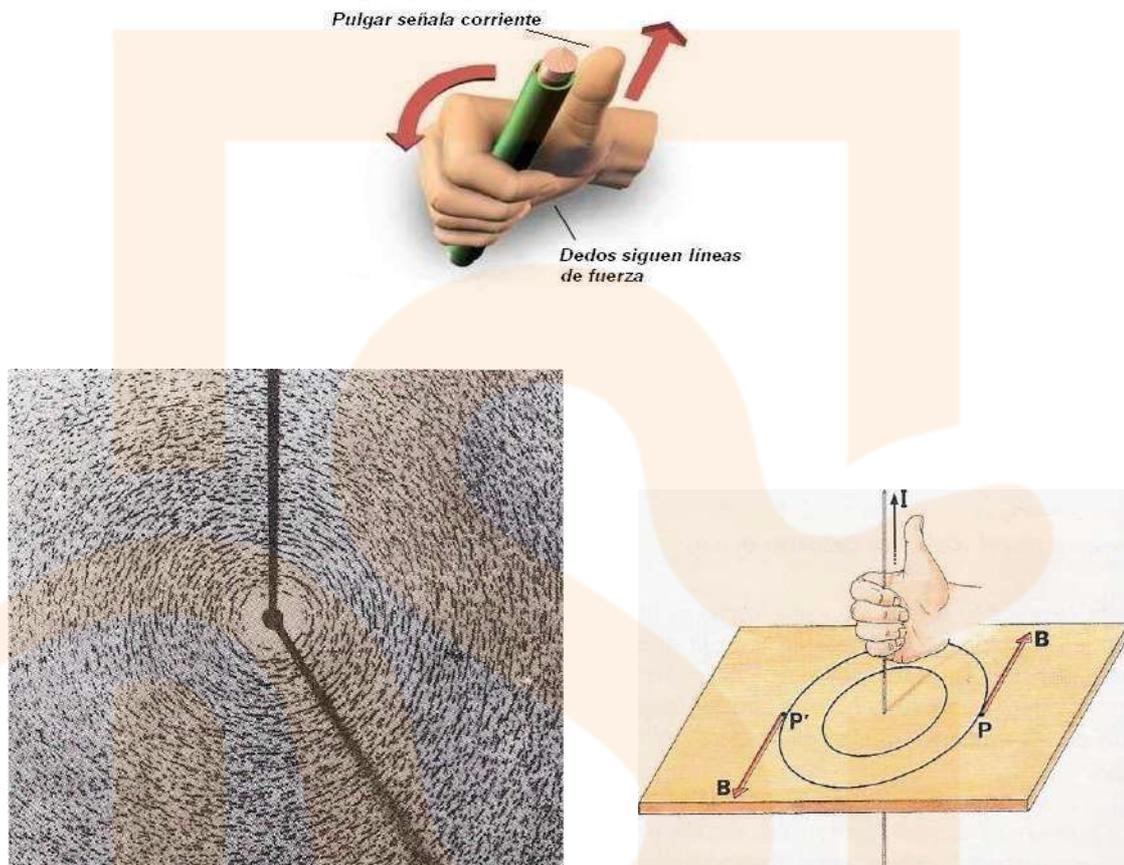


Figura 4.9
Líneas de inducción de una corriente eléctrica rectilínea

El campo magnético producido por una corriente eléctrica de intensidad I que circula por un conductor rectilíneo e indefinido en un punto P próximo al mismo presenta las siguientes características:

- **Dirección:** tangente a las líneas de inducción en cada punto.
- **Sentido:** el de las líneas de inducción determinado por la regla de la mano derecha.
- **Intensidad:** se determina con la expresión

$$\vec{B} = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [4.2]$$

donde:

μ : permeabilidad magnética del medio (en el vacío vale $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$)

I : intensidad de corriente que pasa por el conductor (en amperios: A)

r : distancia del conductor al punto P (en metros: m)

EJEMPLO 1º

Un hilo recto por el que circula una corriente de 0,2 A se encuentra en el vacío situado en el eje de abscisas. Si la corriente circula en el sentido positivo del eje:

- Dibuja las líneas del campo magnético (líneas de inducción magnética) creadas por la corriente eléctrica.
- Dibuja y calcula el campo magnético en los siguientes puntos: A = (0,2,0) m B = (0,-2,0) m
C = (0,0,2) m D = (0,0,-2) m

EJEMPLO 2º

Un hilo recto por el que circula una corriente de 0,2 A se encuentra en el vacío situado en el eje de ordenadas. Si la corriente circula en el sentido positivo del eje:

- Dibuja las líneas del campo magnético (líneas de inducción magnética) creadas por la corriente eléctrica.
- Dibuja y calcula el campo magnético en los siguientes puntos: A = (2,0,0) m B = (-2,0,0) m
C = (0,0,2) m D = (0,0,-2) m

EJEMPLO 3º

Un hilo recto por el que circula una corriente de 0,2 A se encuentra en el vacío situado en el eje z. Si la corriente circula en el sentido positivo del eje:

- Dibuja las líneas del campo magnético (líneas de inducción magnética) creadas por la corriente eléctrica.
- Dibuja y calcula el campo magnético en los siguientes puntos: A = (2,0,0) m B = (-2,0,0) m
C = (0,2,0) m D = (0,-2,0) m

EJEMPLO 4º

Puedes repetir los tres ejemplos anteriores, suponiendo que la corriente eléctrica circula en sentido negativo de los ejes.

EJEMPLO 5º

Dos conductores rectilíneos y paralelos, por los que circulan corrientes de 2 y 4 A, se encuentran en el vacío a 40 cm de distancia.

- a) Dibuja y calcula el campo magnético que crean cada uno de los hilos en un punto situado entre los dos hilos y equidistante de ambos. Calcula el campo magnético resultante en dicho punto.
- b) Haz lo mismo en un punto situado a la izquierda del primer hilo y a 50 cm de él.
- c) Haz lo mismo que en los apartados anteriores en un punto situado a la derecha del segundo conductor y a 80 cm de él.
- d) Razona si existirá algún punto en el que se anule el campo magnético resultante creado por los dos hilos. En caso afirmativo, calcúlalo.



5. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE CARGAS PUNTALES EN MOVIMIENTO: FUERZA DE LORENTZ

La fuerza magnética \vec{F} ejercida sobre una carga puntual q que se mueve con velocidad \vec{v} en el seno de un campo magnético \vec{B} está caracterizada por la ley de Lorentz cuya expresión matemática es:

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

[4.3]

$$|\vec{F}| = |q| |\vec{v}| |\vec{B}| \text{sen}(\alpha, \beta)$$

Esta fuerza se denomina **fuerza de Lorentz** y tiene las siguientes características:

De la ley de Lorentz se extraen las siguientes **conclusiones**:

- Si una carga se introduce en reposo dentro de un campo magnético, no sufre la acción de ninguna fuerza, es decir, los campos magnéticos no actúan sobre cargas en reposo.
- Si la carga se introduce con una velocidad de la misma dirección que el campo magnético, no sufre la acción de fuerza alguna, puesto que los vectores \vec{v} y \vec{B} forman un ángulo de 0° o de 180° , y en ambos casos el seno es cero.
- La dirección de la fuerza de Lorentz siempre es perpendicular a los vectores \vec{v} y \vec{B} , es decir, al plano que contiene a ambos vectores.
- El sentido de la fuerza de Lorentz es el mismo que el producto vectorial si la carga es positiva, o de sentido contrario si la carga es negativa.

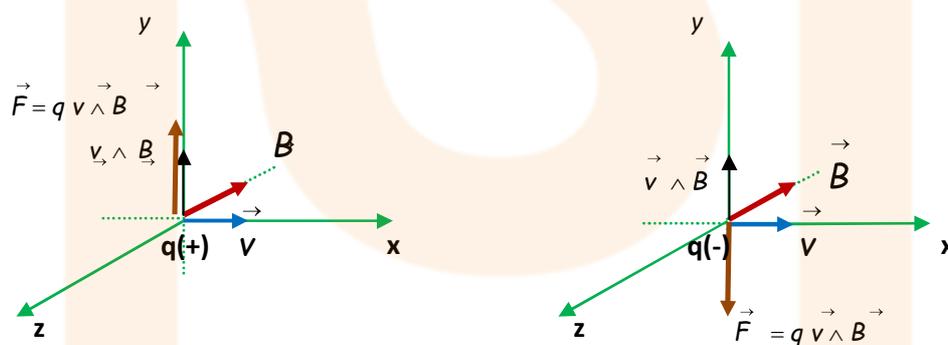


Figura 4.10
Dirección y sentido de la Fuerza de Lorentz

- Si la carga se introduce con velocidad perpendicular a la dirección del campo, la fuerza magnética toma su máximo valor:

$$|\vec{F}|_{\text{máx}} = |q| |\vec{v}| |\vec{B}|$$

- La fuerza magnética es en todo momento perpendicular a la velocidad por lo que no realiza trabajo alguno sobre la carga y, por tanto, no modifica su energía cinética.

- Si la carga se introduce en una región en la que coexisten un campo eléctrico y otro magnético, la fuerza ejercida sobre la misma será igual a la suma vectorial de la fuerza eléctrica y de la fuerza magnética:

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad [4.4]$$

expresión conocida como **fuerza de Lorentz generalizada**.

EJEMPLO 6º

Calcula en cada uno de los casos que se representan, la dirección y el sentido del campo magnético que actúa.



EJEMPLO 7º

Un electrón que se mueve paralelamente al eje de abscisas con una velocidad de 10^5 m/s, entra perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 0,2 T.

- Dibuja la fuerza que experimentará el e^- al entrar en el campo magnético.
- Calcula el valor de la fuerza de Lorentz que actúa sobre el e^- .
- Dibuja razonadamente la dirección y el sentido del campo eléctrico que habría que superponer al magnético para que el e^- no se desviara al entrar en ellos.
- Calcula el módulo del campo eléctrico del apartado anterior.

EJEMPLO 8º

Repite el problema anterior si se trata de un protón.

EJEMPLO 9º

Un conductor rectilíneo por el que circula una corriente de 0,2 A se encuentra en el vacío a lo largo del eje x. En un instante dado un electrón se encuentra a 4 m por encima del hilo con una velocidad paralela al eje z de 10^4 m/s.

- El campo magnético que crea la corriente eléctrica del hilo en el punto donde está el electrón (módulo, dirección y sentido).
- La fuerza magnética que ejerce la corriente eléctrica sobre el electrón en dicho punto (dirección, sentido y módulo).
- Razona cómo debería moverse el electrón en dicho punto para que la fuerza magnética sobre él fuese nula.

6. MOVIMIENTO DE CARGAS PUNTALES EN CAMPOS MAGNÉTICOS

6.1 CARGA QUE ENTRA PERPENDICULARMENTE A UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Si una carga puntual q se introduce con velocidad \vec{v} en dirección perpendicular a un campo magnético \vec{B} , actuará sobre aquella una fuerza magnética $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ que tendrá el valor máximo $|\vec{F}| = |q| |\vec{v}| |\vec{B}|$. Esta fuerza será en todo momento perpendicular a la velocidad por lo que será una fuerza centrípeta que no modificará el valor de la velocidad pero sí su dirección y que, al ser constante, hará que la partícula, de masa m , describa un movimiento circular uniforme (MCU) en el seno del campo magnético.

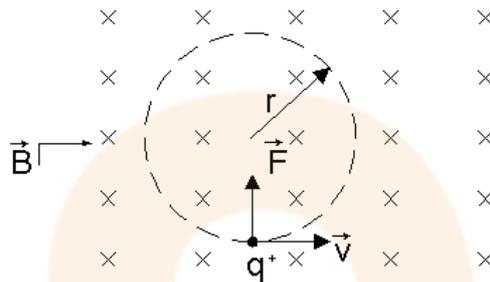


Figura 4.11

Trayectoria de una carga positiva que entra perpendicularmente a un campo magnético uniforme

Aplicando el segundo principio de la Dinámica al MCU, obtenemos:

$$F_{\text{Lorentz}} = F_c \Rightarrow |\vec{F}|_{\text{Lorentz}} = F_c \Rightarrow |q| |\vec{v}| |\vec{B}| = m \frac{|\vec{v}|^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m |\vec{v}|}{|q| |\vec{B}|}$$

$$r = \frac{m |\vec{v}|}{|q| |\vec{B}|} = \frac{mv}{|q| B} \quad [4.5]$$

Esta última expresión proporciona el radio de la trayectoria descrita por la partícula dentro del campo magnético.

Si expresamos tanto la fuerza magnética como la fuerza centrípeta en función de la velocidad angular ω , obtenemos:

$$v = \omega \cdot r \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} = \frac{mv}{|q| B} = \frac{|q| B}{m}$$

$$\omega = \frac{|q| B}{m} \quad [4.6]$$

A esta expresión se le denomina **frecuencia ciclotrón** cuyo valor sólo depende de la relación carga/masa de la partícula y de la intensidad del campo magnético. A partir de ella podemos deducir el periodo T y la frecuencia f del MCU de la partícula: 11!

$$\frac{2\pi m}{T} = \frac{2\pi m}{T} = 2\pi m : \frac{|q| B}{m} = \frac{2\pi m}{|q| B}$$

$$\boxed{T = \frac{2\pi m}{|q| B}} \Rightarrow \boxed{f = \frac{1}{T} = \frac{|q| B}{2\pi m}} \quad [4.7]$$

6.2 CARGA QUE NO ENTRA PERPENDICULARMENTE A UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Si la carga no entra perpendicularmente al campo magnético, siempre es posible descomponer el vector velocidad en dos componentes: una paralela a la dirección del campo y otra perpendicular a dicho campo. La componente paralela no se ve afectada por la fuerza de Lorentz, por lo que el movimiento en esta dirección será un MRU, mientras que la componente perpendicular sí se verá afectada por la fuerza de Lorentz, curvándose como se ha descrito en el apartado anterior. El resultado de la composición de ambos movimientos será un movimiento helicoidal como se indica en la siguiente figura:

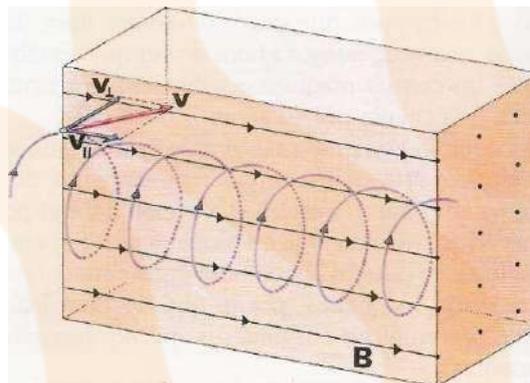


Figura 4.12

Trayectoria de una carga que no entra perpendicularmente a un campo magnético uniforme

6.3 CARGA QUE ENTRA A UN CAMPO MAGNÉTICO NO UNIFORME

Si además el campo no es uniforme, la curvatura de la trayectoria helicoidal será mayor en aquellas zonas en la que el campo aumenta. En esta situación puede demostrarse además, que la componente paralela disminuye, de modo que las vueltas de la hélice están más próximas a medida que aumenta el campo y, si este es suficientemente intenso, la componente paralela de la velocidad llega a anularse, forzando a la carga a retroceder. A este dispositivo se le denomina “espejo magnético”.

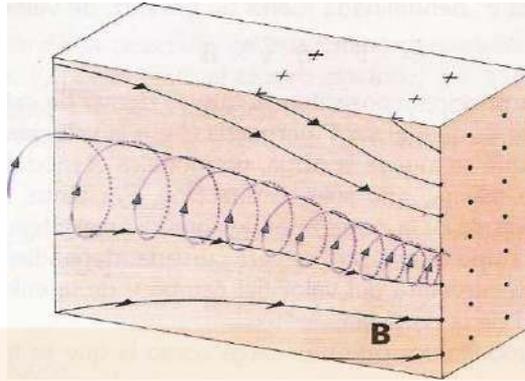


Figura 4.13

Trayectoria de una carga en un campo magnético no uniforme (espejo magnético)

Si en el lado opuesto ocurre lo mismo, la carga quedará confinada en dicha región. A este dispositivo se le denomina botella magnética. Este dispositivo es utilizado actualmente para confinar gases ionizados o plasmas como en los experimentos de fusión nuclear.

EJEMPLO 10º

Un electrón que se mueve paralelamente al eje de abscisas con una velocidad de 10^5 m/s, entra perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 0,2 T.

- Dibuja la fuerza que experimentará el e^- al entrar en el campo magnético.
- Calcula el valor de la fuerza de Lorentz que actúa sobre el e^- .
- Dibuja razonadamente la trayectoria seguida por el e^- dentro del campo magnético.
- Calcula el radio, el periodo y la frecuencia del movimiento del e^- ($m_{e^-} = 9,11 \cdot 10^{-31}$ Kg).

EJEMPLO 11º

Repite el problema anterior si se trata de un protón ($m_{p^+} = 1,67 \cdot 10^{-27}$ Kg)..

EJEMPLO 12º

Un electrón y un protón poseen la misma velocidad v y entran perpendicularmente a un campo magnético uniforme \vec{B} .

- Dibuja la trayectoria seguida por cada una de las cargas en el interior del campo magnético.
- Razona cualitativamente (sin cálculo numérico) quién de las dos cargas curva más su trayectoria (tiene menor radio)

EJEMPLO 13º

Un electrón y un protón, que inicialmente están en reposo, son acelerados por la misma ddp eléctrica. Calcula:

- La relación que existe entre sus energías cinéticas, una vez acelerados.
- La relación que existe entre sus velocidades.
- Si una vez acelerados entran perpendicularmente a un campo magnético de intensidad B, calcula la relación que existe entre los radios de sus trayectorias ($m_{p^+} = 1833m_{e^-}$).

7. FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CORRIENTE RECTILÍNEA

La corriente eléctrica consiste en el desplazamiento de cargas eléctricas a lo largo de un conductor. Por tanto, si situamos adecuadamente un conductor rectilíneo de longitud l , por el que pasa una corriente eléctrica de intensidad I en el seno de un campo magnético uniforme B , éste ejercerá una fuerza magnética sobre cada una de las cargas (electrones) que se desplazan por el conductor.

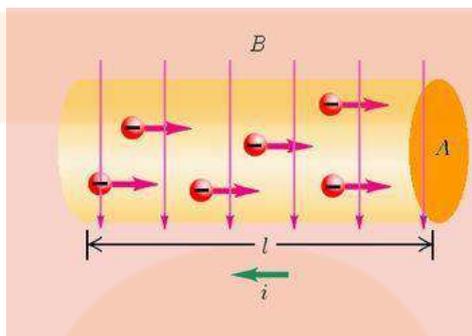


Figura 4.14

Movimiento de los electrones en el interior de un conductor

La fuerza magnética ejercida sobre todo el conductor será la resultante de las ejercidas sobre cada uno de los portadores de carga que circulan por él. Se puede demostrar que dicha fuerza tiene la siguiente expresión:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B} \quad [4.8]$$

Donde:

I es la intensidad de corriente que circula por el hilo medida en A.

\vec{l} es el vector longitud del conductor cuya dirección es la de éste, cuyo sentido es el de la corriente que pasa por él y cuyo módulo es la propia longitud l del conductor medida en m.

\vec{B} es el vector intensidad de campo magnético que ejerce la fuerza sobre el conductor rectilíneo.

De la expresión anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La dirección de la fuerza es perpendicular al plano en el que se encuentran el conductor y el campo magnético.
- El sentido de la fuerza es el mismo que el producto vectorial $\vec{l} \wedge \vec{B}$.

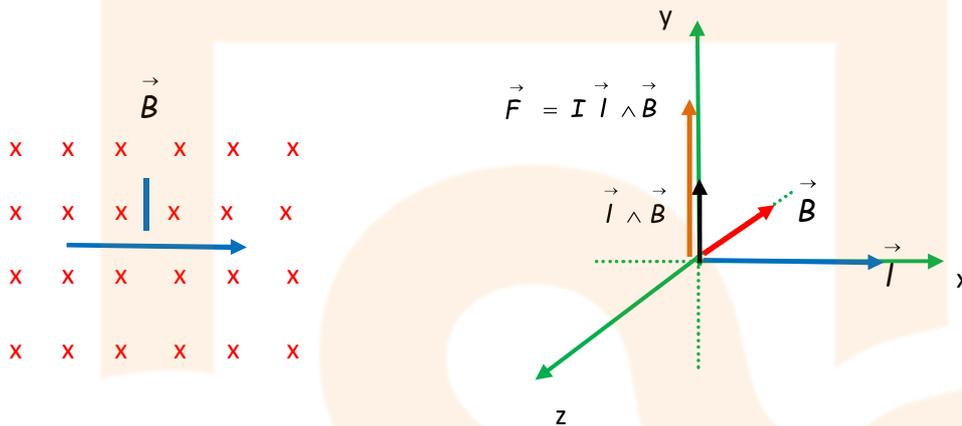
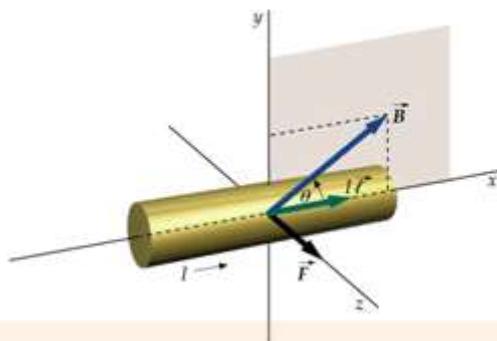


Figura 4.15

Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

- o El módulo de la fuerza es

$$|\vec{F}| = I \cdot |l| \cdot |B| \cdot \text{sen}(\alpha, B) \quad [4.9]$$

- o Si el hilo está colocado paralelamente a las líneas de campo, este no ejerce ninguna fuerza sobre aquél, ya que los vectores \vec{l} y \vec{B} tendrían la misma dirección (paralelos o antiparalelos), formando entre ellos un ángulo de 0° o 180° , y en ambos casos el seno vale 0.

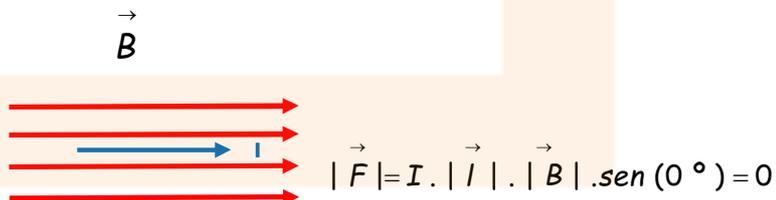


Figura 4.16

Conductor situado en la misma dirección que las líneas de fuerza

- Si el hilo está colocado perpendicularmente a las líneas de campo, este ejercería sobre aquél la máxima fuerza, ya que los vectores I y \vec{B} serían perpendiculares, formando entre ellos un ángulo de 90° y el seno vale 1.

EJEMPLO 14º

Un conductor de 10 cm de lado está situado sobre el eje de abscisas. Por él, circula una corriente eléctrica de 5 A, dirigida en sentido negativo. En la región en la que se sitúa el conductor existe un campo magnético uniforme de 0,01 T, dirigido según el eje Z, en sentido creciente.

- Calcula la fuerza (módulo, dirección y sentido) que actuará sobre el conductor.
- Idem, si el campo es paralelo al plano XZ y forma 60° con el eje Z
- Idem, si el campo tiene la dirección del eje X.
- Idem, si el campo está dirigido según el eje Y, hacia las y crecientes.

EJEMPLO 15º

Supongamos un hilo conductor recto de 0,3 m de longitud y 20 g de masa. Dicho conductor está en una región en la que existe un campo magnético de 1 T, saliente del papel.

- Calcula la intensidad que debe circular por el hilo, y el sentido en el que ha de circular, para que el conductor se mantenga en equilibrio.
- ¿Qué sucedería si, una vez conseguido lo anterior, se duplicase la longitud del hilo.

8. FUERZA MAGNÉTICA ENTRE CORRIENTES RECTILÍNEAS, PARALELAS E INDEFINIDAS

Supongamos dos conductores rectos de longitudes l_1 y l_2 por los que circulan corrientes de intensidades I_1 e I_2 , respectivamente, dispuestos paralelamente uno respecto del otro y separados una distancia d . Cada uno de ellos producirá un campo magnético en cada uno de los puntos que forman el otro cuyos valores vendrán dados por:

$$|\vec{B}_1| = B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

$$|\vec{B}_2| = B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

Dichos campos son perpendiculares a cada uno de los conductores ($\theta = 90^\circ$) por lo que ejercerán sendas fuerzas sobre cada conductor de valores máximos respectivos:

$$F_{12} = \vec{I}_2 \cdot l_2 \cdot |\vec{B}_1| = I_2 \cdot l_2 \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \cdot l_2}{2\pi d}$$

$$F_{12} = |\vec{F}_{12}| = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \cdot l_2}{2\pi d} \quad [4.12]$$

$$F_{21} = \vec{I}_1 \cdot l_1 \cdot |\vec{B}_2| = I_1 \cdot l_1 \cdot \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \cdot l_1}{2\pi d}$$

$$F_{21} = |\vec{F}_{21}| = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \cdot l_1}{2\pi d} \quad [4.13]$$

Si los conductores son indefinidos, conviene utilizar la expresión de la fuerza por unidad de longitud:

$$f = \frac{F}{l}$$

que resulta ser la misma para cada conductor:

$$f_1 = f_2 = \frac{F_{12}}{l_2} = \frac{F_{21}}{l_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad [4.14]$$

Interacción entre corrientes rectilíneas y paralelas:

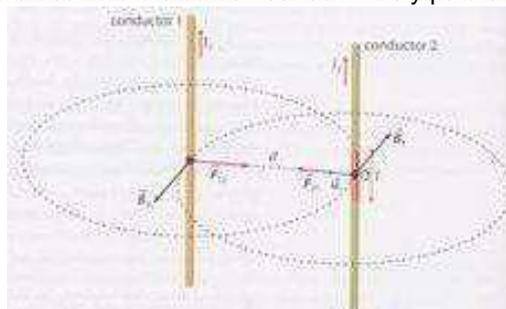


Figura 4.17

Esta fuerza será atractiva si las corrientes circulan en el mismo sentido (como el caso de la anterior figura) y repulsiva si circulan en sentidos opuestos.

La ecuación [4.14] permite dar la siguiente definición de amperio como unidad fundamental de intensidad de corriente en el S.I.:

Un amperio es la intensidad de corriente que debe circular por dos conductores paralelos, rectilíneos e indefinidos y separados 1 m en el vacío, para que se atraigan o repelan con una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ N por unidad de longitud.

EJEMPLO 16º

Por dos conductores rectilíneos y paralelos, que se encuentran separados 40 cm en el vacío, circulan sendas corrientes eléctricas de 2 y 4 A en sentido contrario. Calcular:

- a) El campo magnético que crea cada una de ellas donde está la otra.
- b) La fuerza por unidad de longitud que ejerce una sobre la otra.