



PRÁCTICAS DE ELECTRICIDAD

SIMULACIÓN DE PROBLEMAS MAGNÉTICOS



Créditos del material utilizado:

Davidson
physics



MIT
Physics 8.02
ELECTRICITY & MAGNETISM

Curso de física por ordenador
A. Franco García

Versión para imprimir:



1 Introducción

Una de las dificultades asociadas al estudio de los campos magnéticos es la visualización de las líneas de campo (aunque en algunos casos se pueden ver mediante limaduras de hierro o fluidos ferromagnéticos). A esto se une la característica de que las fuerzas magnéticas son perpendiculares a la corriente, a la velocidad de las cargas y al campo magnético.

En esta práctica se van a reforzar y complementar algunos conceptos vistos en las prácticas anteriores, gracias a las posibilidades gráficas y de cálculo que ofrecen los ordenadores.

Durante la sesión de prácticas únicamente se realizarán algunos apartados, ya que la realización de todos los apartados requiere bastante más de dos horas. El resto de apartados que aparecen en este guión se han incluido como ejercicios para hacer en casa que pueden ayudar a afianzar los conceptos vistos en clase. La práctica se puede consultar en Internet en las direcciones:

add.unizar.es/126_13700/magnetismo.htm o add.unizar.es/126_21107/magnetismo.htm
o www.unizar.es/icee04/magnetismo.htm (servidores para electrónicos, eléctricos y de reserva)

NOTA: si el navegador muestra incorrectamente los caracteres acentuados, haga click con el ratón en la parte en dónde aparecen símbolos extraños y presione tecla "F5".

2 Objetivos:

- ✓ Reforzar los conceptos de producto vectorial, elemento de corriente $I d\vec{\ell}$, campo magnético \vec{B} e integral de circulación $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$.
- ✓ Experimentar con el campo \vec{B} que crean corrientes perpendiculares a la pantalla.
- ✓ Calcular la fuerza (módulo, dirección y sentido) que experimenta un cable por el que circula corriente debido a la corriente que circula en otros.
- ✓ Calcular la fuerza (módulo, dirección y sentido) que experimenta una partícula cargada que se mueve dentro de un campo magnético (fuerza de Lorentz, $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$).
- ✓ Comprobar la ley de Ampere para el vacío y aplicarla para detectar la corriente que circula por cables.
- ✓ Utilizar el principio de superposición para comprobar cómo un cable coaxial genera campo magnético en el espacio entre los dos conductores.
- ✓ Afianzar el concepto de flujo magnético y practicar su cálculo.
- ✓ Visualizar la variación de flujo en una espira y justificar el sentido de la corriente inducida.
- ✓ Estudiar el fenómeno del apantallamiento y de las cargas inducidas en conductores.

3 Conocimientos requeridos

El estudiante debe manejar con soltura la geometría, vectores, integración y debe estar familiarizado con el vector de campo magnético \vec{B} y la fuerza que genera sobre conductores en el seno de un campo magnético. También debe conocer y saber aplicar la ley de Ampere y el concepto de flujo eléctrico. También son convenientes nociones básicas de manejo del ordenador e internet. Es necesario tener una *calculadora* para realizar la práctica.

Índice

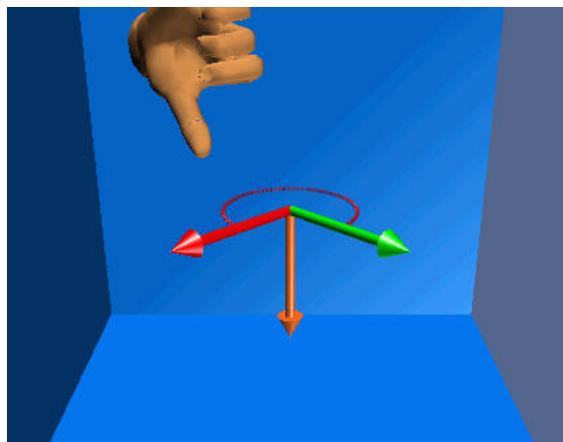
1	Introducción	1
2	Objetivos:	1
3	Conocimientos requeridos	1
4	Repaso de conceptos	3
4.1	Producto vectorial $\vec{A} \times \vec{B}$	3
5	Campos magnéticos creados por corrientes	4
5.1	Campo magnético \vec{B} creado por un elemento de corriente $I d\vec{\ell}$	4
5.2	Campo magnético \vec{B} creado por hilos infinitos	5
6	Campos magnéticos creados por imanes	8
6.1	Campo de un imán	8
6.2	Imanes, brújulas y limaduras	9
7	Fuerzas magnéticas	10
7.1	Fuerza sobre un alambre portador de corriente entre los polos de un imán de herradura	10
7.2	Fuerza entre dos conductores muy largos y paralelos	11
8	Ley de Ampere	13
8.1	Ley de Ampère e integral de línea	13
8.2	Cable rectilíneo y largo con corriente uniforme	14
8.3	Circular y encontrar las corrientes	16
8.4	Cable coaxial	16
8.5	Fuerza entre alambre y cilindro	16
9	Principio superposición y Biot-Savart	18
9.1	Campo de hilos y espiras	18
9.2	Campo magnético de una espira	19
10	Fuerza de Lorenz	19
10.1	Un espectrómetro de masas	19
10.2	Ordene los campos magnéticos	20
11	Inducción magnética	21
11.1	Campo variable y área variable	21
11.2	Espira en un campo magnético variable con el tiempo	21
11.3	Generador de corriente eléctrica	23
11.4	Espira próxima a alambre	24
11.5	Autoinducción	25
11.6	Determinar la dirección de la corriente	26
11.7	Fuerza sobre una espira	27
11.8	FEM en la espira	27
11.9	Determinar la orientación del campo magnético	28
11.10	Campo de un generador	28

4 Repaso de conceptos

En este apartado opcional se pueden revisar conceptos como la suma y el producto escalar de vectores y el concepto de fuerzas conservativas.

4.1 Producto vectorial $\vec{A} \times \vec{B}$

Pulse sobre el enlace “*Producto vectorial*” de la barra de navegación izquierda. Aparecerá a la derecha la imagen de un vector verde que representa un elemento de corriente $I\vec{dl}$, otro rojo que representa el campo magnético \vec{B} y un tercero naranja que representa la fuerza ($I\vec{dl} \times \vec{B}$). La mano derecha que aparece en la figura indica el sentido de giro más corto del vector verde $I\vec{dl}$ al rojo \vec{B} y el pulgar coincide con el sentido de la fuerza $I\vec{dl} \times \vec{B}$.



Por definición, el producto vectorial de dos vectores es otro perpendicular a ellos. En la imagen inicial, los vectores $I\vec{dl}$ y \vec{B} están contenidos en un plano horizontal. El producto $I\vec{dl} \times \vec{B}$ es perpendicular al plano horizontal. El sentido (hacia arriba o hacia abajo) se obtiene aplicando la regla de la mano derecha (sentido indicado por el pulgar de la mano derecha mientras el resto de los dedos realicen el giro más corto desde el primer al segundo vector) o del tornillo (sentido de avance de un tornillo o tuerca que realiza el giro más corto desde el primer al segundo vector).

En la imagen aparece un arco de círculo que indica el ángulo entre los dos vectores (0° a 360°) y el sentido de la mano siempre apunta al giro más corto desde el primer vector verde al segundo rojo.

Instrucciones:

- Para cambiar el punto de vista, pulsa el ratón y muévelo.
- Para acercar y alejar la imagen, pulsa la tecla Control mientras mueves el ratón.
- Teclas flechas derecha \rightarrow e izquierda \leftarrow : Cambia el ángulo que forma el vector rojo \vec{B} respecto el verde $I\vec{dl}$.
- Teclas flechas arriba \uparrow y abajo \downarrow : cambia la magnitud del vector rojo \vec{B} .
- I: Muestra o esconde las instrucciones.

Ejercicio:

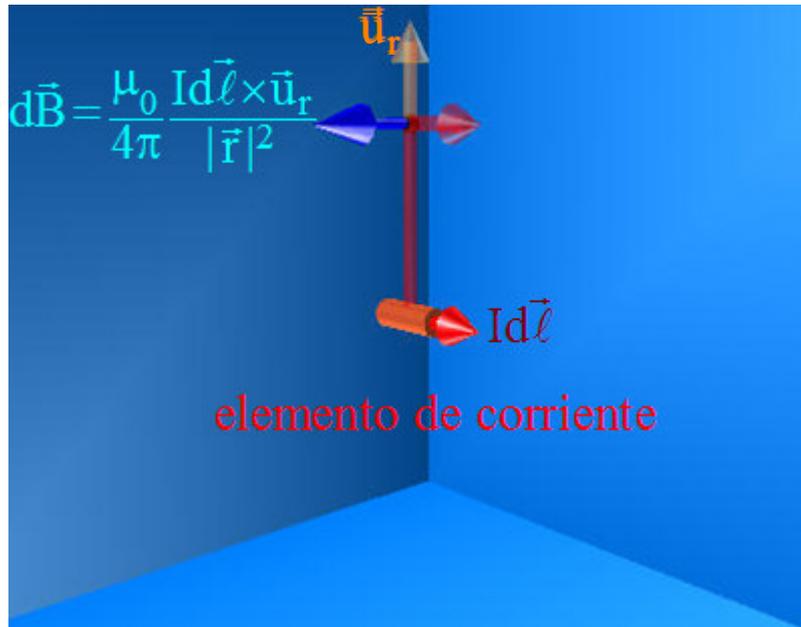
- Utiliza las teclas derecha e izquierda hasta que conseguir que $I\vec{dl} \times \vec{B} \sim 0$
 - ¿cuál es el ángulo entre $I\vec{dl}$ y \vec{B} ?
 - ¿qué orientación deben tener $I\vec{dl}$ y \vec{B} para la fuerza magnética sea máxima?
 - Si un cable tiene la misma dirección que el campo magnético ¿cuál será la fuerza magnética sobre él?

Nota: $|\vec{A} \times \vec{B}| = |\vec{A}| |\vec{B}| \sin \theta$

5 Campos magnéticos creados por corrientes

5.1 Campo magnético \vec{B} creado por un elemento de corriente $I\vec{d\ell}$

Pulse sobre el enlace “Elemento de corriente” de la barra de navegación izquierda. Aparecerá una visualización que explica la Ley de Biot y Savart. En un punto del espacio se coloca un trozo de conductor (representado por un tubo naranja) que es recorrido por una corriente en sentido marcado por la flecha roja.



- La flecha roja \rightarrow representa el elemento de corriente $I\vec{d\ell}$, que tiene el mismo sentido que la corriente. Por comodidad de cálculo, la flecha roja se ha trasladado al punto donde se desea conocer (los vectores se pueden desplazar –sin rotarlos ni cambiar su longitud– a cualquier punto del espacio).
- La flecha translúcida naranja \uparrow en el punto de cálculo representa \vec{u}_r , un vector de longitud estándar cuya dirección es la de la recta que une el elemento de corriente $I\vec{d\ell}$ con el punto donde se desea conocer \vec{B} , en ese mismo sentido.
- La flecha azul \leftarrow representa el campo magnético \vec{B} en el punto de interés. Observad que \vec{B} tiene el sentido de $I\vec{d\ell} \times \vec{u}_r$. Es habitual referirse a ese campo utilizando la notación diferencial, ya que el elemento de corriente es corresponde a un trozo pequeño de un circuito y para obtener el campo total creado por todo el circuito hay que integrar ese diferencial de campo magnético.

Instrucciones:

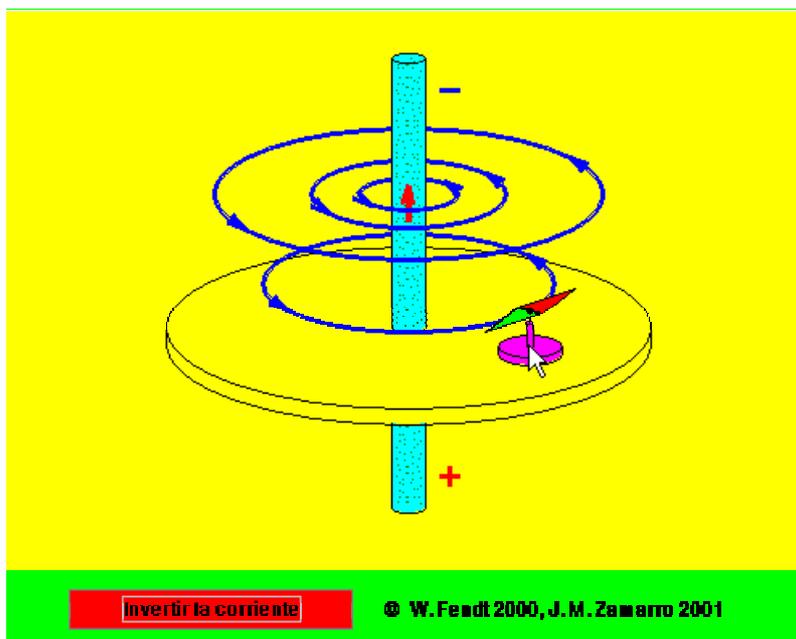
- Para cambiar el punto de vista, pulsa el ratón y muévelo.
- Para acercar y alejar la imagen, pulsa la tecla *Ctrl* mientras mueves el ratón.
- Con las teclas de dirección $\leftarrow \uparrow \downarrow \rightarrow$ puede variar la posición del punto donde se calcula \vec{B} en los ejes Z e Y.
- Pulsando la tecla *Ctrl* y $\uparrow \downarrow$ movemos el punto de cálculo en el eje X.
- I: Muestra o esconde las instrucciones.

Ejercicio:

- Mueve el punto donde mides \vec{B} utilizando las teclas derecha e izquierda hasta que conseguir que $\vec{B} \sim 0$.
 - A parte de los puntos muy alejados del elemento de corriente, ¿en qué otros puntos se anula \vec{B} ?
 - ¿Cuál es el ángulo entre $I \vec{dl} \times \vec{u}_r$?

5.2 Campo magnético \vec{B} creado por hilos infinitos

Una corriente eléctrica produce un campo magnético. Esta animación simula una experiencia relativa al campo magnético generado por una corriente eléctrica continua que circula por un hilo rectilíneo indefinido. Una corriente intensa circula por un hilo vertical. Se puede invertir el sentido de la corriente mediante el botón rojo. Los signos en los extremos del hilo simbolizan la polaridad de la batería conectada. La dirección convencional de la corriente viene dada por las flechas rojas. ¡Observe que el movimiento de los electrones (puntos verdes) es opuesta a la dirección convenida de la corriente!



Una aguja imantada que puede ser desplazada (arrastrando el ratón con el botón presionado) muestra la dirección del campo magnético (azul) en una posición dada. Los polos norte y sur de la aguja están pintados de color rojo y verde respectivamente. Se desprecia la influencia del campo magnético terrestre.

- Explique en un par de líneas y con sus propias palabras porqué se mueven los electrones en sentido opuesto a la corriente.

5.2.1 Un único conductor perpendicular a la pantalla

Pulse sobre el enlace “Conductor muy largo perpendicular a la pantalla” de la barra de navegación izquierda. Aparecerá un vídeo que muestra las líneas de campo creadas por un cable (representado con texturas). El cable está situado en el centro del “remolino”, perpendicularmente a la pantalla (sólo se ve un pequeño círculo central correspondiente a su sección, pues vemos el cable de frente).

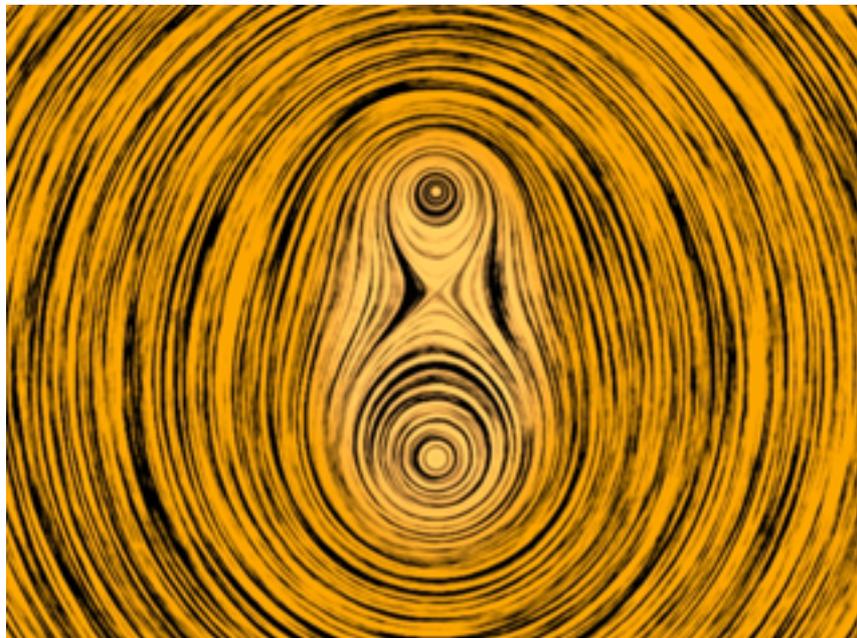


Ejercicio: Deducir la dirección de la corriente a partir del sentido de giro de \vec{B} .

- ¿La corriente sale o entra de la pantalla?

5.2.2 Dos conductores perpendiculares a la pantalla. Circulación en el mismo sentido.

Pulse sobre el enlace “*Dos cables, misma circulación*” de la barra de navegación izquierda. Aparecerá un vídeo que muestra las líneas de campo creadas por dos conductores. Los cables están situados en los centros de los remolinos, perpendicularmente a la pantalla (sólo se aprecia su sección).



Ejercicio: Deducir la dirección de la corriente a partir del sentido de giro de \vec{B} .

- ¿La corriente sale o entra de la pantalla en cada uno de los conductores?

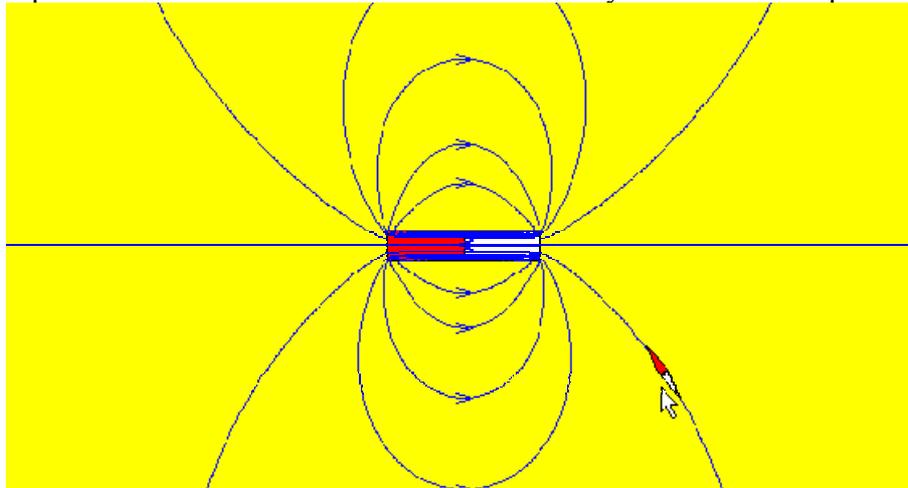
5.2.3 Dos conductores perpendiculares a la pantalla. Circulación en sentido opuesto.

Ejercicio: Deducir la dirección de la corriente a partir del sentido de giro de \vec{B} .

6 Campos magnéticos creados por imanes

6.1 Campo de un imán

El campo magnético de un imán puede investigarse con una aguja imanada. Observe que las líneas de campo tienen la dirección de la brújula que se coloque en un punto por donde ellas pasen. Las líneas tienen información del sentido del campo, coincidente con el que da la brújula (de Norte a Sur). Las líneas de campo no codifican con colores la intensidad del campo sino con la concentración espacial de líneas. La densidad de líneas es mayor donde el campo sea más intenso.



Borrar líneas de campo

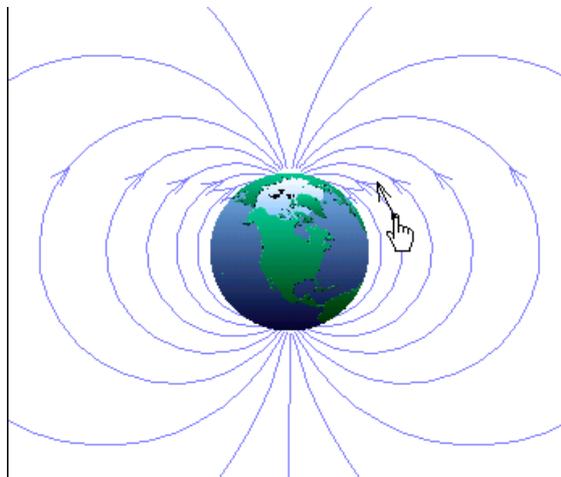
Gírar imán

© W. Fendt, J.M. Zamarró 2001

Si mueves la aguja imanada con el ratón, se dibujará la línea de campo magnético que pasa por el centro de la aguja imanada en color azul. Las flechas azules indican la dirección del campo magnético que se define como la dirección indicada por el polo norte de la aguja imanada. Si giras el imán utilizando el botón rojo, la dirección de las líneas de campo se invierte. El botón izquierdo permite borrar todas las líneas del campo.

Ejercicio: Deduce a partir de las líneas de campo magnético las zonas con mayor intensidad de campo.

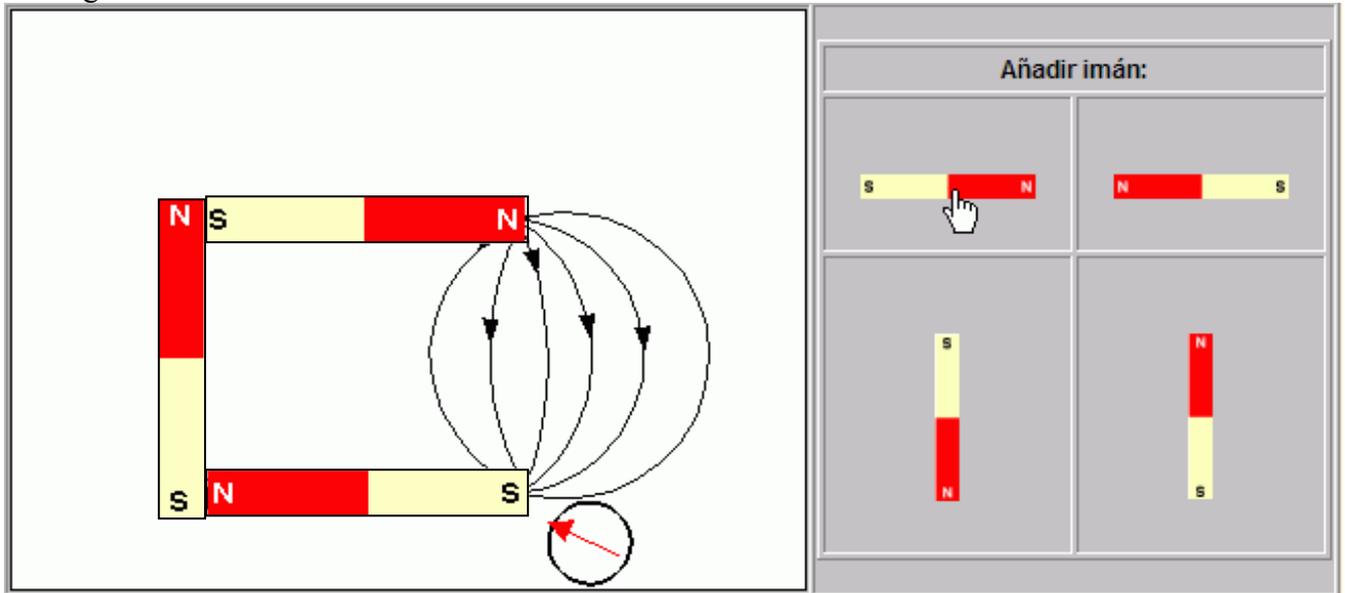
Ejercicio: El polo norte de una brújula apunta hacia el polo geográfico Norte. Según esto... ¿en el polo geográfico Norte hay a un polo magnético Norte o Sur?



6.2 Imanes, brújulas y limaduras

En este punto se trata de visualizar el campo creado por varios imanes. Cuando concatenamos polos N y S de varios imanes, las líneas de campo circulan preferentemente por los imanes, saltando por el aire en los extremos de la cadena o cuando enfrentamos dos polos del mismo tipo juntos.

Utilizando varios imanes de barra, construiremos un imán en forma de herradura, tal como muestra la imagen.



Por defecto, la animación se cargará con un imán en el centro de la animación. Pulsando en las imágenes de los imanes a derecha, irán apareciendo imanes en la parte de la derecha. El círculo con la fleja roja representa una brújula, que se orienta según el campo (en la figura aparece apuntando al sur). Utilice la brújula para explorar el campo magnético alrededor del imán moviendo la brújula por dichos alrededores. Una brújula es un pequeño imán permanente; su flecha está en el polo Norte de dicho pequeño imán (y apunta hacia el polo Sur de otro imán próximo). Haga un dibujo mostrando las direcciones en que apunta la brújula en varios puntos. Incluya suficientes puntos como para hacer un diagrama significativo.

Para dibujar la línea de campo que pasa por un punto, basta con hacer doble clic sobre ese punto.

Ejercicio: Ponga la brújula sobre la línea ¿la brújula se orienta en la misma dirección que la línea de campo o en dirección perpendicular? A continuación dibuje las líneas de campo para algunas representaciones que se detallan en el notebook.

Si pulsamos el botón “mostrar campo”, veríamos los vectores del campo magnético. Los colores de los vectores presentados indican la intensidad del campo magnético, mientras que las orientaciones de los vectores corresponden a las del campo.

Si hiciéramos el montaje en el laboratorio y espolvoreásemos limaduras, éstas se alinearían según los vectores de campo magnético, y la fuerza con la que se alinearían correspondería a la codificación de colores del campo (más fuerza de alineación, colores rojo-negro, fuerzas magnéticas más débiles en azul tenue).

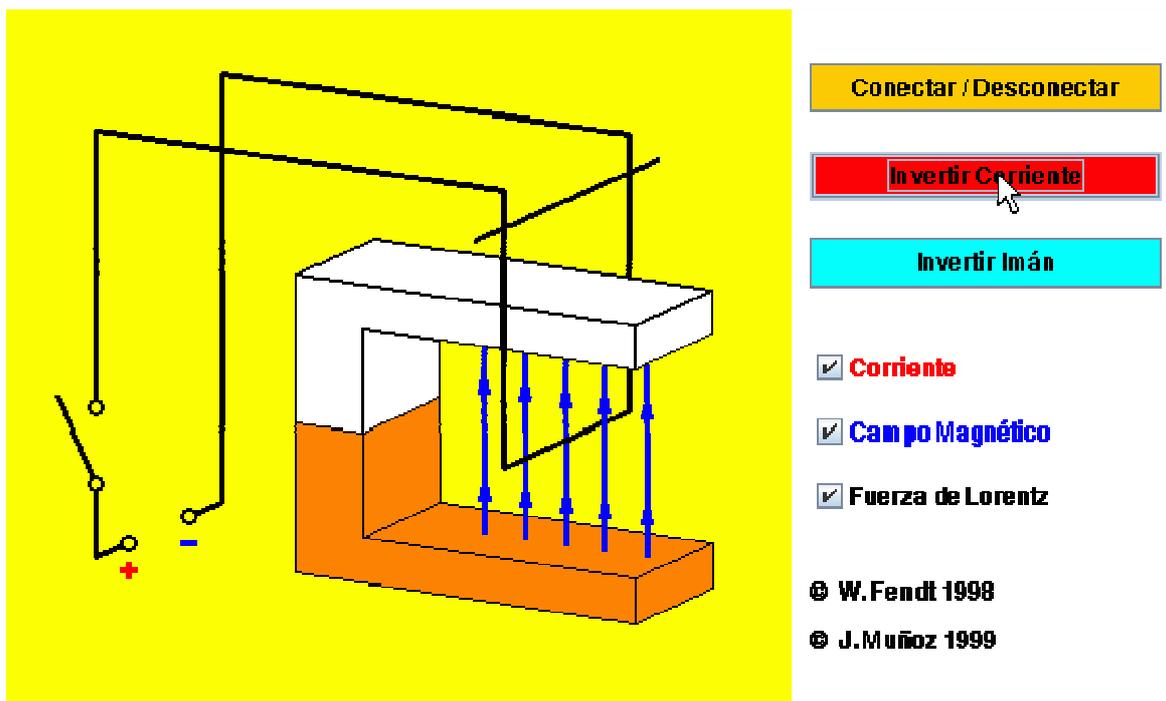
Una vez completado este diagrama, active la presentación de los vectores del campo para ver dicha representación del campo magnético. **¿Se corresponde el diagrama de vectores con el elaborado por usted?**

7 Fuerzas magnéticas

En este apartado, se revisarán las fuerzas magnéticas como interacción a distancia entre corrientes (o entre corrientes y campos magnéticos).

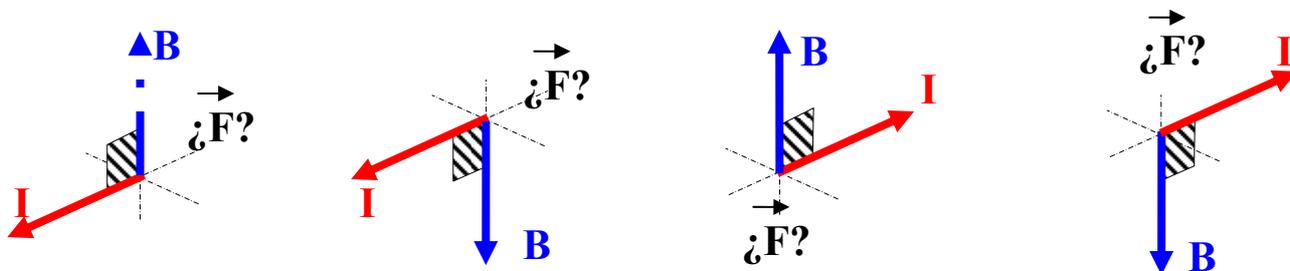
7.1 Fuerza sobre un alambre portador de corriente entre los polos de un imán de herradura

En este apartado tenemos un conductor en el espacio entre los polos de un imán en forma de U. Al cerrar el interruptor (pulsando el botón naranja “Conectar/Desconectar”), circula una corriente por el conductor en el seno de un campo magnético y la varilla experimenta una fuerza.



Ejercicio: Deduce el sentido de la fuerza magnética.

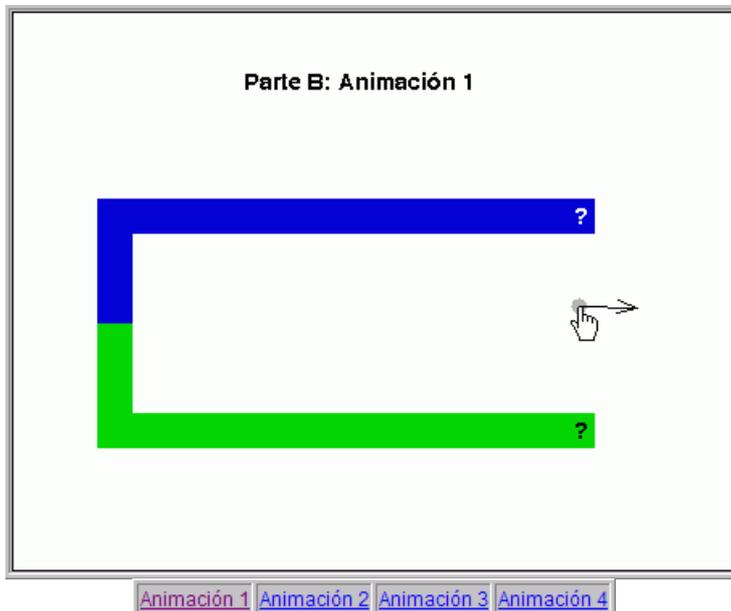
Pulsando sobre los botones “Invertir Corriente” e “Invertir imán”, comprueba el sentido de la fuerza en las siguientes configuraciones y dibuja la fuerza resultante. Observa que la dirección obtenida corresponde al producto vectorial $\vec{dF} = I \vec{dl} \times \vec{B}$.



En general, la representación en perspectiva es laboriosa. Por ello, se suele utilizar una representación simplificada en 2D. En ella, los conductores perpendiculares al plano de representación se dibujan como \odot cuando sale del plano de la pantalla. Cuando la corriente entra se representan como \otimes .

Ejercicio: Deduce el sentido de la corriente

A continuación, procede a obtener la fuerza en un conductor perpendicular a la pantalla que se encuentra entre los polos de un imán de herradura. El punto gris que aparece en la pantalla representa un conductor recorrido por una corriente cuyo sentido se quiere determinar mediante fuerzas magnéticas.



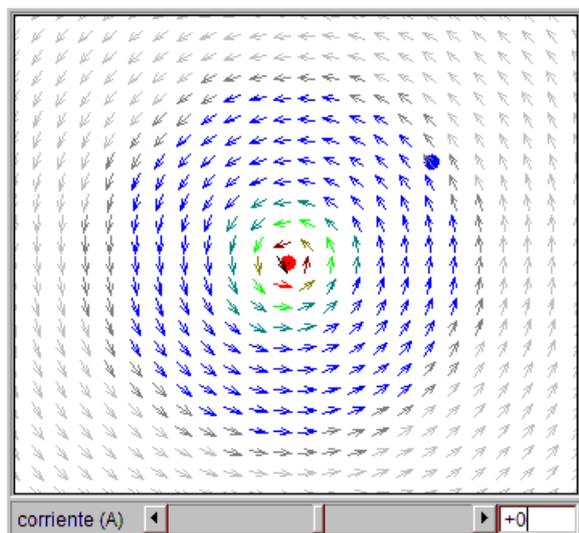
Previo a seleccionar una animación debe contestar a la parte a). Después puede pasar a contestar a la parte b), trabajando con las animaciones disponibles.

- Identifique los polos del imán de herradura. Puede utilizar la brújula que se incluye.
- Determine qué animación muestra correctamente la fuerza sobre un alambre por el que circula una corriente que sale de la pantalla. Puede arrastrar el alambre para moverlo de un lado a otro observando la orientación de la fuerza.

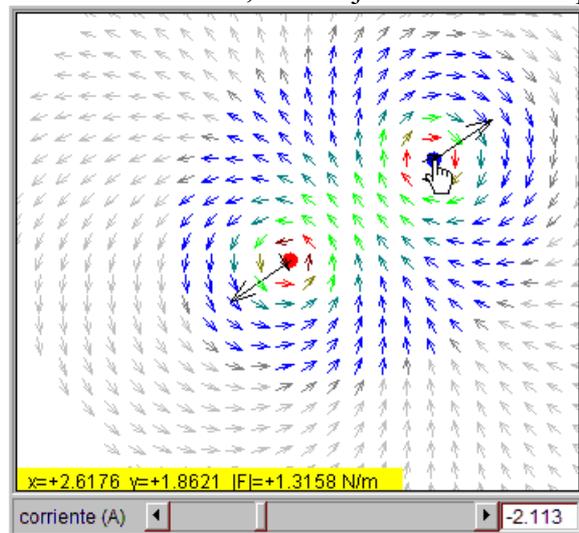
7.2 Fuerza entre dos conductores muy largos y paralelos

En este apartado se estudiará la fuerza entre conductores muy largos y paralelos. El alambre central en la animación lleva una corriente constante.

Ejercicio: Deduce el sentido de la corriente en el conductor rojo perpendicular a la pantalla a partir del sentido de giro del campo magnético



Al cargar la página, no circula corriente por el conductor azul (corriente $I = 0$). Puede cambiar la corriente del alambre en azul mediante el cursor deslizante (posición en metros, corriente en amperios e intensidad de campo magnético en teslas). Se muestra el diagrama de vectores del campo y, mediante doble-clic en la animación, se dibujan líneas de campo.



Al dar corriente al alambre azul, podemos hacerlo entrando en el plano (negativa) o saliendo del plano (positiva). Estas flechas representan las fuerzas sobre cada alambre ejercida por el campo magnético del otro.

Ejercicio: Dibujar el diagrama de fuerzas sobre el conductor azul, $d\vec{F} = I d\vec{\ell} \times \vec{B}$.

Teniendo en cuenta la expresión de fuerza magnética sobre un conductor, $d\vec{F} = I d\vec{\ell} \times \vec{B}$, al dar corriente positiva al alambre azul, ¿qué orientación tendrá la fuerza sobre los portadores de carga móviles en su interior (corriente eléctrica)? Compruébelo fijando un valor positivo para la corriente y observando la orientación de las flechas en negro que aparecen.

Mueva el alambre azul a una nueva posición. La fuerza cambiará de orientación pero se mantendrá dirigida hacia el otro alambre (fuerzas atractivas para corrientes en el mismo sentido). Observe que aumentando la corriente la fuerza crece proporcionalmente. Si se cambia el sentido de la corriente (pasarla de valor positivo a negativo) se observa que las fuerzas se hacen repulsivas, manteniéndose dirigidas en la dirección perpendicular a los alambres (dirección que pasa por los circulitos rojo y azul que representan sus secciones transversales). Observe también que las fuerzas se hacen pequeñas cuando se aumenta la distancia entre los alambres, y viceversa. Esto se debe a que también la intensidad del campo magnético decrece con la distancia al hilo con corriente que lo produce.

Ejercicio: Dibujar el diagrama de fuerzas sobre el conductor azul, $d\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$.

Suponga que la corriente (positiva) hacia afuera en el alambre azul está producida por cargas negativas (electrones libres en el conductor) que viajan hacia dentro del plano. Sabiendo la orientación del campo magnético y la velocidad de los portadores, compruebe que la fuerza de Lorentz, $q \vec{v} \times \vec{B}$, da la orientación correcta de la fuerza. Llegaría al mismo resultado si supusiera, para la corriente saliente en el alambre azul, que está producida por cargas positivas moviéndose hacia fuera.

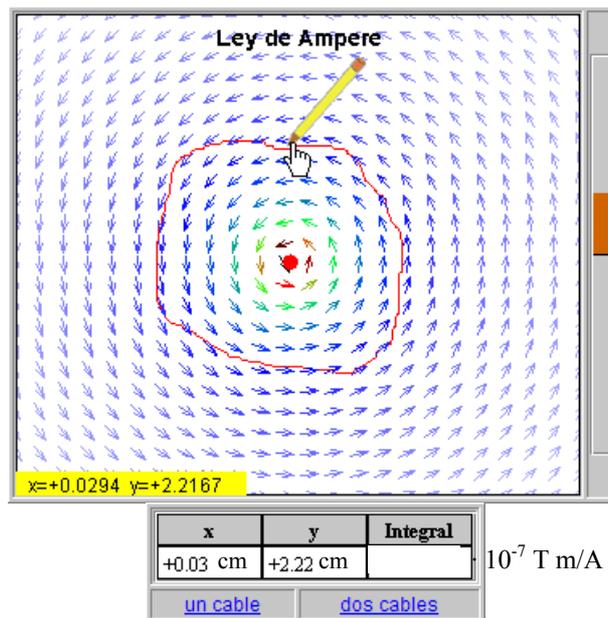
No hemos hablado más que de la fuerza sobre el alambre azul. Obviamente, sobre el alambre central (rojo) tendremos una fuerza igual y opuesta (Tercera Ley de Newton) a la actuante sobre el alambre azul.

8 Ley de Ampere

8.1 Ley de Ampère e integral de línea.

En esta animación se calcula la integral de línea alrededor de un conductor fino y se comprueba la Ley de Ampere. Esta ley puede expresarse como $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{enlazada}$, siendo la integración de línea alrededor de cualquier camino cerrado (que suele denominarse línea amperiana); $d\vec{\ell}$ es el vector elemento de longitud a lo largo del camino en un punto dado de él, $I_{enlazada}$ es la corriente enlazada por el trayecto cerrado de integración y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$ es la permeabilidad magnética del vacío.

Comencemos con un alambre. Estudie el diagrama de vectores. Seleccione un punto y active el cálculo de la integral de línea, arrastre el lápiz dando una vuelta alrededor del alambre, en sentido contrario al de las agujas del reloj, regresando al punto de partida. ¿Cuál es el valor de la integral de línea?

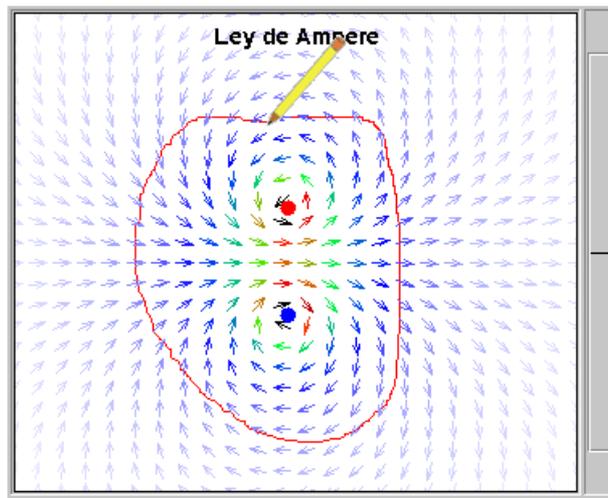


Pulse el botón "hacer integral = 0" para inicializar el cálculo. Desactive el cálculo de la integral y seleccione otro punto inicial. Después de reactivar el cálculo de la integral, de nuevo dé una vuelta (manteniendo el sentido antihorario) alrededor de la corriente pero siguiendo un camino diferente al anteriormente utilizado. ¿Cuánto vale ahora la integral de camino? Hemos cambiado el camino y los valores del vector \vec{B} en los puntos del nuevo camino, así como los vectores elementos de longitud son totalmente diferentes. Sin embargo, el resultado de la integración de línea es el mismo que para el camino anterior. Esto es lo que dice la Ley de Ampère, que la integral de camino sólo depende de la corriente enlazada.

Vayamos ahora en sentido contrario, recorramos un camino cerrado alrededor de la corriente pero en sentido horario. Recuerde poner a cero la integral y desactivar/activar el cálculo de la integral. Si fuéramos por uno de los caminos anteriores, lo único que cambiaría es el sentido del vector elemento de longitud, $d\vec{\ell}$, que sería opuesto al inicial. Esto da lugar a un cambio en el signo de los productos escalares $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ parciales y en la suma (integral) final. Si utilizamos una regla de la mano derecha para asignar un sentido a la normal al área que se apoya en una línea cerrada, sentido antihorario supone vector normal saliendo del papel, como la corriente y, de aquí, el signo positivo para recorrido antihorario. Recorrido con sentido horario supone normal dirigida hacia adentro, en

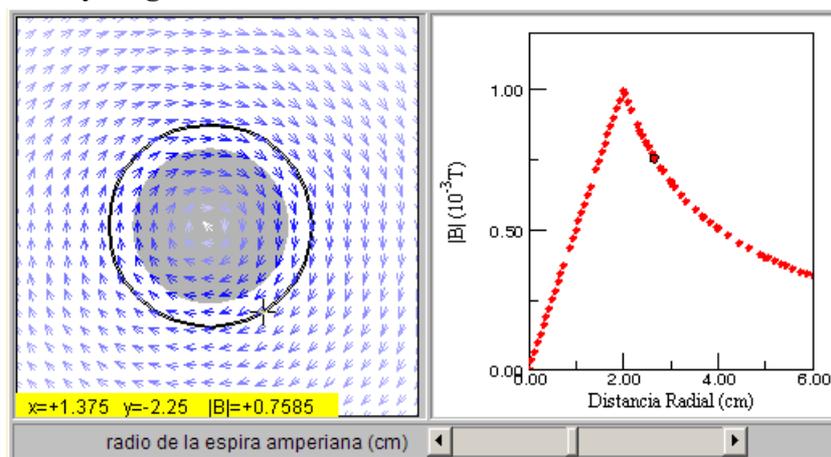
sentido opuesto a la corriente, y por ello el signo negativo para la integral de línea con recorrido en sentido horario.

Probemos ahora con dos alambres con corriente. De nuevo estudie la distribución de campo magnético. Seleccione un punto inicial y, con la integral activada, circule de nuevo alrededor del alambre rojo. Los campos han cambiado pero la circulación es coincidente a cuando sólo teníamos el alambre rojo. Circule ahora (después de inicializar la integral) por un camino que enlace a los dos alambres. ¿Cuánto vale ahora la integración? Estudie el significado de corriente enlazada en el segundo miembro de la Ley de Ampère. El resultado de la integración es cero, lo que significa que la corriente neta enlazada es nula y, por ello, las dos corrientes enlazadas son iguales y opuestas (una sale y la otra entra).



Conviene destacar el hecho de que la circulación sea nula no puede inducirse que el campo magnético sea nulo. Sólo en casos de simetría acusada podrían extraerse conclusiones de tal tipo. Lo único que indica que la circulación sea cero es que la corriente enlazada es cero.

8.2 Cable rectilíneo y largo con corriente uniforme.



El círculo en gris corresponde a la sección transversal de un alambre largo que lleva corriente perpendicularmente al plano de la pantalla. La corriente se supone uniformemente distribuida por toda la sección del alambre (**posición en centímetros e intensidad de campo magnético en militeslas**). La circunferencia en negro es una línea amperiana, alrededor de la cual se calculará la circulación y con un radio que puede usted cambiar de valor mediante el cursor deslizante al efecto.

Comience con una línea amperiana de radio mayor que el del alambre.

- a. ¿Cuál es el radio de la línea amperiana?
- b. ¿Cuál es el campo magnético para este radio?

Utilizará la Ley de Ampère para encontrar la corriente neta por el alambre:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\text{enlazada}}$$

siendo la integración de línea alrededor de cualquier camino cerrado (línea amperiana); $d\vec{\ell}$ es el vector elemento de longitud a lo largo del camino en un punto dado de él, I_{enlazada} es la corriente enlazada por el trayecto cerrado de integración y $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T/(A/m)}$ es la permeabilidad magnética del vacío. Seleccione un punto en la trayectoria amperiana y dibuje tanto el vector magnético como el vector elemento de longitud (tangente a la trayectoria).

- c. Los vectores \vec{B} y $d\vec{\ell}$ son paralelos. ¿Cuánto vale $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$?

Seleccione otro punto en la línea amperiana.

- d. ¿Cuál es el valor del módulo del campo magnético en dicho punto? ¿Y en cualquier otro punto del camino?
- e. Esto significa que usted puede escribir $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = B \oint d\ell$. ¿Por qué?

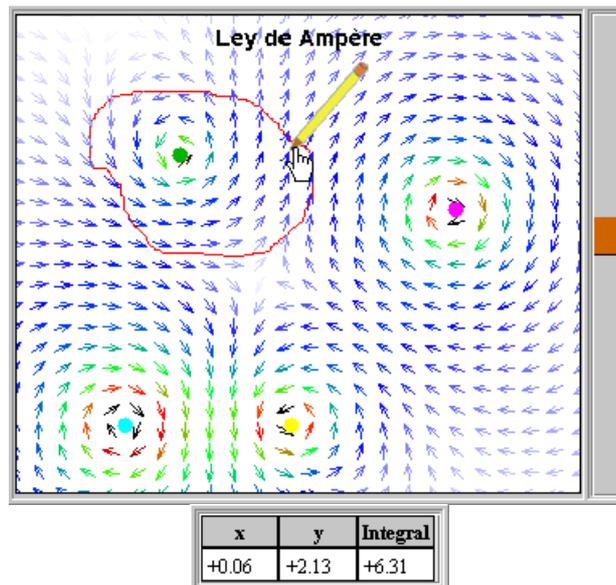
$\oint d\ell$ es sencillamente la longitud de la línea amperiana (en nuestro caso una circunferencia). Por tanto, se obtiene $B = \mu_0 I / 2\pi r$, para el exterior del alambre que es donde hemos estado trabajando.

- f. A partir de medidas del campo magnético, calcule la corriente neta que lleva el alambre.
- g. Cambie el radio del camino (pero manteniéndolo exterior al alambre) y prediga el campo magnético que habrá sobre los puntos del camino. Verifique su respuesta midiendo el valor de la intensidad de dicho campo.

Haga el camino amperiano de menor radio de forma que quede dentro de la sección transversal del alambre. Ahora la corriente enlazada no coincidirá con la corriente total sino con la fracción de corriente total que le corresponde proporcionalmente a su área: $I_{\text{enlazada}} = I (r/a)^2$, siendo a el radio del alambre y r , menor que a , el radio de la línea amperiana.

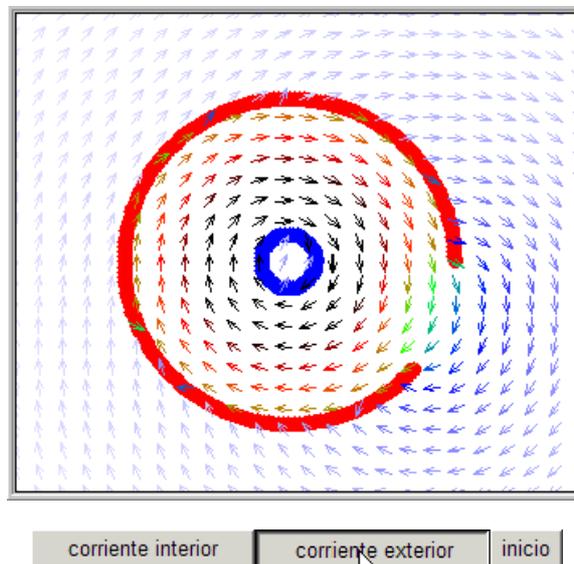
- h. ¿Por qué?
- i. Utilice el valor anterior de la corriente enlazada para, aplicando la Ley de Ampère, poder predecir el campo magnético en el interior del alambre.
- j. Mida dicho campo y verifique su respuesta anterior.
- k. Demuestre que la expresión general que nos da el campo en el interior del alambre es $(\mu_0 I / (2\pi a^2))r$.

8.3 Circular y encontrar las corrientes.



Encuentre la corriente que porta cada uno de los cuatro alambres incluidos en la animación. Cada alambre lleva corriente bien hacia dentro o hacia fuera de la pantalla (**posición en milímetros y campo magnético en militeslas, de forma que la integral de camino viene dada en $mT\ mm = 10^{-6}\ T\ m$**). Puede activar el cálculo de la integral y el cursor se cambiará a un lápiz con el que dibujar el camino, al tiempo que se va calculando la integral de camino del campo magnético ($\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ a lo largo del camino que dibuje). En cualquier momento puede inicializar a cero la integral o desactivar/mover-cursor/activar la integral de línea para comenzar desde otro punto.

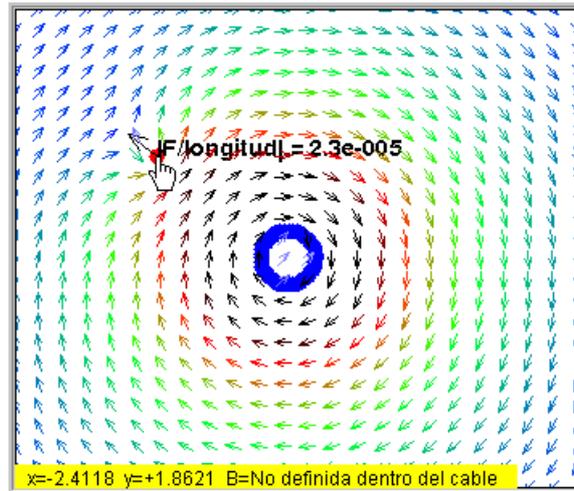
8.4 Cable coaxial



Un cable coaxial consta de un conductor interior y otro exterior separados por un aislante (aire o un relleno de plástico que hace de soporte). Normalmente los dos conductores están alimentados por un extremo y se conectan a una carga (resistencia o similar) por el otro, con lo cual llevan corrientes iguales y opuestas. Habrá visto estos cables conectando la señal de antena a su TV o, también, en ciertos tipos de conexión entre ordenadores. Se simula el coaxial mediante alambres rectos y largos, que se ponen uno al lado de otro, tal como se ve en la animación. Se muestra cómo se va modificando el campo magnético a medida que se va construyendo el coaxial (**posición en milímetros e intensidad de campo magnético en microteslas, $10^{-6}\ T$**).

- Construya el coaxial añadiendo alambres portadores de corriente. Explique por qué considera que, en algunas aplicaciones, este tipo de cable puede ser preferible a los cables de dos hilos utilizados en los cableados eléctricos convencionales.
- Explique por qué el campo es cero fuera del cable y, también, dentro del cable interior (azul).
- Puede pinchar y arrastrar mientras lee la intensidad del campo magnético en el punto que desee. Encuentre el valor de la corriente que lleva el conductor interior.

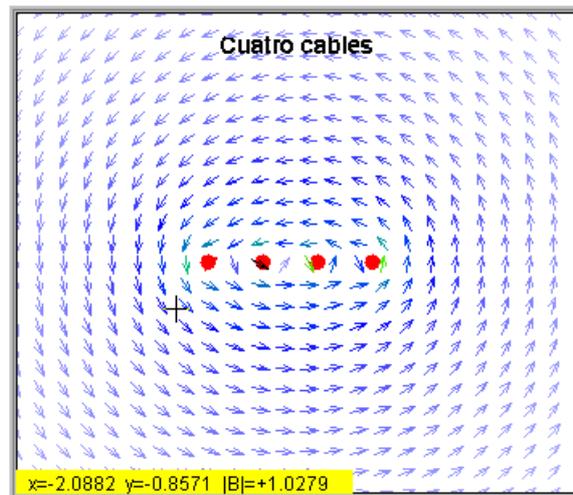
8.5 Fuerza entre alambre y cilindro



Tomando la corriente que circula por el tubo azul del apartado anterior, determine la corriente que circula por el alambre rojo. Puede arrastrar dicho alambre y leer la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre él, debida al campo magnético del cable central (azul). También, cuando el cursor lo tiene fuera de los cables, puede leer el valor de la intensidad de campo magnético donde desee (**posición en centímetros, intensidad de campo magnético en 10^{-5} tesla y fuerza por unidad de longitud en N/m**). Por último, puede activar o cerrar el paso de corriente por el alambre rojo, mediante los botones al efecto.

9 Principio superposición y Biot-Savart

9.1 Campo de hilos y espiras



un cable cuatro cables placa espira solenoide inicio

El campo magnético de un alambre recto y largo que lleva corriente tiene líneas que yacen en el plano transversal al alambre y lo enlazan como circunferencias concéntricas con él (**posición en metros e intensidad de campo magnético en teslas**). Puede que le interese conocer la regla de la mano derecha para determinar la orientación del campo magnético: Si usted apunta con el dedo pulgar en el sentido de la corriente (hacia afuera de la pantalla) y pone curvados el resto de los dedos (como abrazando al alambre), estos dedos le darán la orientación del campo magnético.

Ahora, en lugar de un solo alambre ponga cuatro (de nuevo con corrientes que salen de la pantalla). Los campos magnéticos individuales se sumarán (vectorialmente) para dar el campo total. Haga doble-clic en el interior de la imagen para que se dibuje una línea de campo.

¿Cómo esperaría fueran las líneas de campo magnético cuando añadiera una hilera de alambres muy juntos (formando de hecho un plano de corrientes). Cuando lo piense, compruebe su predicción pulsando el botón etiquetado como "placa". Explique por qué las líneas de campo son como son.

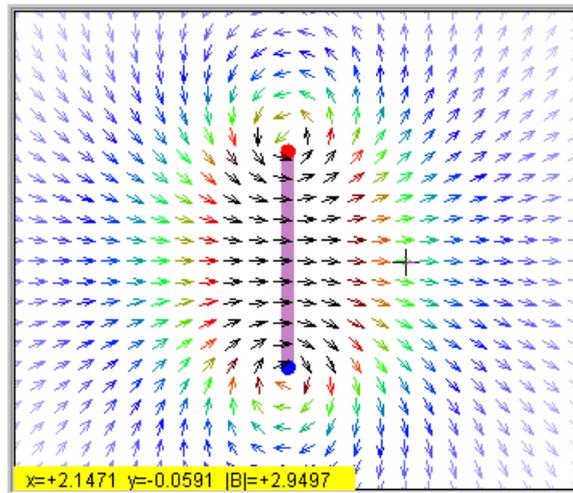
El campo resultante para el plano de corrientes tiene dirección x dado que las componentes y dan una suma cero. Dado el sentido supuesto para las corrientes (hacia fuera de la pantalla) el campo apunta hacia la izquierda por la parte superior y hacia la derecha por la parte inferior de la placa.

Pasemos ahora a observar el campo de una espira metálica portadora de corriente. En la vista presentada es como si la mirara por el borde: El alambre entra en la pantalla, la enlaza circularmente y sale por el otro lado. Los circulitos rojo y azul representan un corte de la espira por un plano que contiene a su eje, indicando el rojo que la corriente sale y el azul que entra en la pantalla. El campo por la zona central tiene líneas casi rectas apuntando hacia la derecha y que divergen en cuanto nos separamos de las proximidades del eje. Observe aquí una ampliación de la regla de la mano derecha, también muy útil: Poniendo los dedos meñique a índice curvados en el sentido de la corriente, el pulgar recto apunta en el sentido de las líneas del campo en las zonas axiales. Cambie el tamaño de la espira pinchando y arrastrando en alguno de los circulitos (rojo o azul). Observe que el campo en la zona central de la espira se hace más y más uniforme a medida que aumentamos el tamaño de ésta. También, que si muestreamos el campo en el plano de la espira observamos que es más intenso en las zonas más alejadas del centro.

Si coloca muchas espiras, una al lado de la otra, ¿qué campo cree que resultará? Compruébelo pulsando el botón "solenoides". Compare los campos correspondientes a un solenoide y el campo del plano de corrientes ya analizado; indique semejanzas y diferencias. De nuevo aquí ocurre que las componentes y del campo magnético se cancelan resultando un campo en la dirección x . En el exterior el campo tiende a cero pues, al ser las líneas cerradas, para un solenoide largo las líneas se cierran muy lejos y el resultado es una bajísima concentración de líneas de campo en las proximidades externas (para un solenoide infinito el campo exterior sería rigurosamente cero). En el interior el campo es esencialmente uniforme y dirigido hacia la derecha, dado el sentido de la corriente.

El estudio del campo de un solenoide puede hacerse mediante la Ley de Ampère.

9.2 Campo magnético de una espira.

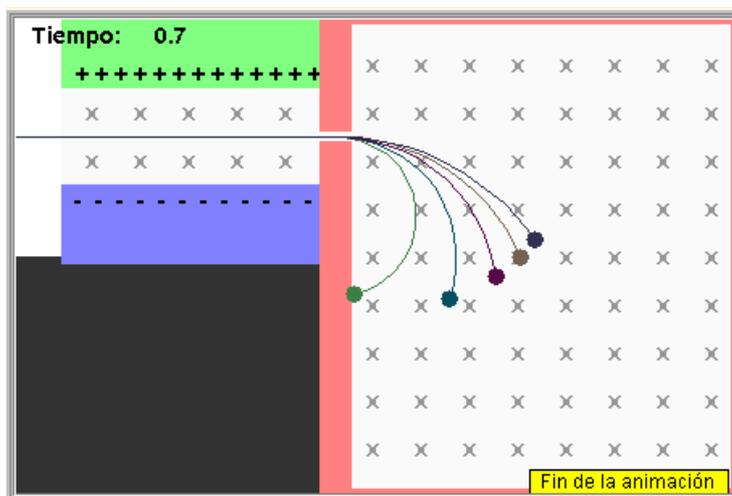


La animación muestra la sección transversal de una espira portadora de corriente que está orientada perpendicularmente a la pantalla (con su eje en el plano de la pantalla) (**posición en centímetros e intensidad de campo magnético en militeslas**). Puede mover la espira (arrastrando desde su centro) o cambiarla de tamaño (arrastrando bien el circulito rojo o bien el azul).

- a) ¿Cuál es la corriente que circula por la espira?
- b) Desarrolle una expresión para el campo magnético en el centro de la espira en función de su radio. Verifique la expresión con la animación.

10 Fuerza de Lorentz

10.1 Un espectrómetro de masas

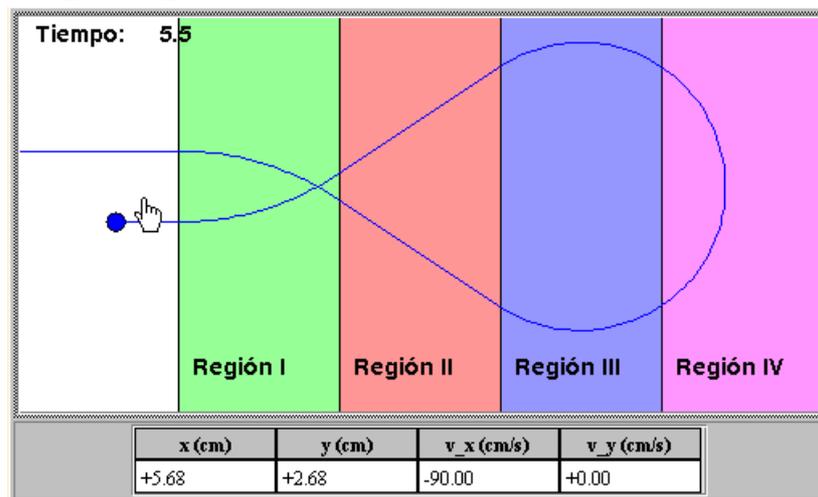


Inicie esta animación seleccionando la [demostración de Masas Múltiples](#). Se muestra en ella un conjunto de cinco partículas que pasan por un aparato denominado espectrómetro de masas. Las partículas tienen diferente masa siendo de resto idénticas. Observe cómo las partículas son separadas debido a tener masas diferentes.

Puede introducir valores para las condiciones iniciales y pulsar "registrar valores y marcha", con objeto de ver una partícula única pasar a través del espectrómetro. La partícula pasa inicialmente por una región en la que existe un campo eléctrico dirigido verticalmente hacia abajo y un campo magnético perpendicular a la pantalla y hacia dentro. Como la partícula está cargada negativamente, el campo eléctrico ejerce una fuerza hacia arriba ($\mathbf{F} = q \mathbf{E}$) mientras que el campo magnético ejerce inicialmente una fuerza hacia abajo ($\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$). Ponga el campo magnético o el eléctrico a cero con objeto de ver el efecto de cada campo aisladamente. Para cierta combinación de valores de campo eléctrico y magnético los efectos de ambos campos se cancelan y la partícula pasa sin desviarse por la primera región. A esta región se la denomina selector de velocidades, ya que sólo partículas con una determinada velocidad inicial pasarán sin desviarse para un par de valores dado de los campos eléctrico y magnético.

Si una partícula pasa por la primera región, entra en otra donde sólo existe un campo magnético aplicado. Este campo magnético ejerce una fuerza ($\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$), perpendicular a la velocidad de la partícula que hace que ésta siga un movimiento circular. Para una velocidad dada (seleccionada previamente) el radio de la trayectoria seguida por la partícula depende de su masa. En este movimiento circular la fuerza es radial y tiene de módulo $|\mathbf{F}| = q |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = qvB$, que, por la Segunda Ley de Newton, debe coincidir con el producto masa por aceleración (centrípeta), dado por mv^2/R . En lo anterior se ha hecho uso de que velocidad y campo magnético son perpendiculares. Finalmente, llegamos a: $qB = mv/R$. Midiendo dónde impacta la partícula puede usted determinar la masa de la misma.

10.2 Ordene los campos magnéticos



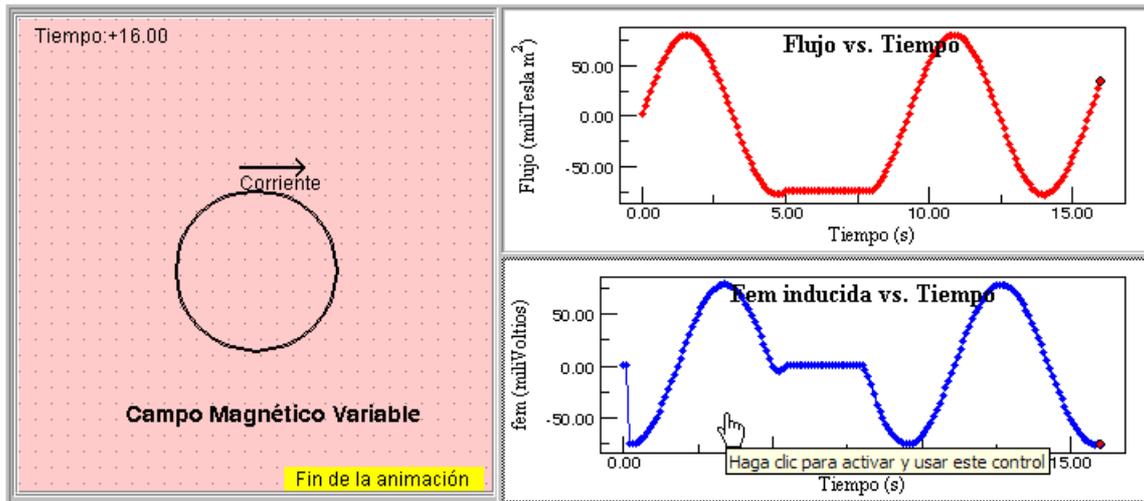
Se lanza un electrón que pasa sucesivamente por cuatro regiones donde actúan sendos campos magnéticos perpendiculares a la pantalla y uniformes en cada región (**posición en centímetros y tiempo en segundos**).

- ¿Qué orientación tiene el campo magnético en cada región?
- Ordene las regiones en términos de la intensidad de campo magnético actuante (de menor a mayor).
- ¿Cómo cambiaría la trayectoria si invirtiéramos el sentido del campo magnético en cada región?

- d) Si deseara que la partícula no entrara en la región II, ¿aumentaría o disminuiría la velocidad con que entra la partícula en la región I? Dé una prueba matemática a su respuesta.

11 Inducción magnética

11.1 Campo variable y área variable.



En esta ilustración consideraremos la Ley de Faraday, que nos dice que un campo magnético variable crea un campo eléctrico. En concreto, si una espira enlaza un flujo magnético, Φ , variable con el tiempo, en ella se induce una fuerza electromotriz (*fem*) que coincide con el ritmo con que cambia el flujo, cambiado de signo: $fem = -d\Phi/dt$. El flujo magnético nos mide la cantidad de líneas de campo que atraviesan una superficie dada. El flujo que atraviesa un elemento de área viene dado por el producto escalar del campo sobre dicho elemento multiplicado escalarmente por el vector elemento de área (**posición en metros, intensidad de campo magnético en militeslas, fem en milivoltios y tiempo en segundos**).

Considere la animación [Campo Magnético Variable](#). Se muestra una espira metálica situada en una región donde el campo magnético, uniforme, varía senoidalmente con el tiempo; después es constante y comienza a variar de nuevo senoidalmente. El gráfico de la derecha muestra la *fem* inducida y el flujo magnético que atraviesa la espira en función del tiempo. Se indica mediante una flecha el sentido de la corriente por el lado superior de la espira. Se indica, también, en azul cuando el campo magnético penetra en la pantalla; en rojo cuando sale de la pantalla. La intensidad del color es proporcional al valor del módulo del campo magnético actuante.

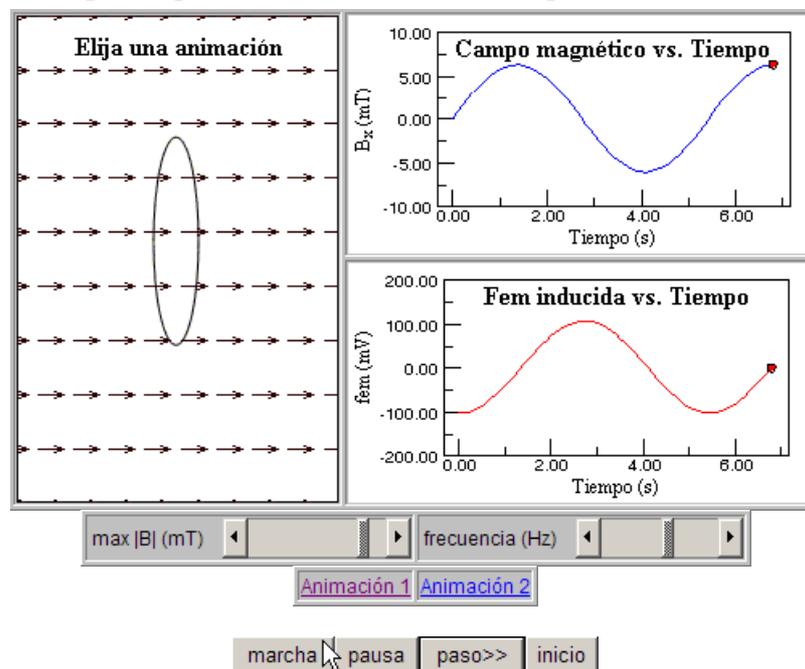
Observe que, para los primeros 1.5 s de la animación, hay un flujo magnético creciente que atraviesa la espira debido a que el campo magnético, saliente de la pantalla, está creciendo. Observe también que, durante el intervalo de tiempo citado, hay una *fem* inducida en la espira y una corriente inducida en sentido horario. ¿Es el sentido de la corriente el esperado? Podría también estar en sentido contrario al que usted espera. Debido al signo menos en la Ley de Faraday (parte que se conoce como Ley de Lenz), la *fem* es igual a menos la variación del flujo magnético, es decir, a la pendiente, cambiada de signo, de la curva que da el flujo en función del tiempo. De $t = 0\text{ s}$ a $t = 1.5\text{ s}$ el flujo magnético está aumentando y, por ello, la *fem* es negativa. Observe ahora la animación durante el tiempo restante y fíjese en cómo varía la *fem* con el tiempo.

Considere la animación [Área Variable](#). Se muestra una espira cuya área varía con el tiempo sometida a un campo magnético, perpendicular a la pantalla y saliendo de ella, constante en el tiempo (a diferencia de lo que ocurría en la animación anterior en que el área era fija y el campo

magnético variaba con el tiempo). Los gráficos de la derecha muestran de nuevo la *fem* inducida en la espira y el flujo magnético que la atraviesa, en función del tiempo. Se indica el sentido de la corriente mediante la flecha colocada en la parte superior de la espira. En rojo se indica campo magnético saliente de la pantalla.

De nuevo el flujo magnético aumenta durante los primeros 1.5 s de la animación. De nuevo observe que la *fem* es negativa durante este intervalo de tiempo. Compare los dos gráficos de la primera animación con los de la segunda. ¿Qué observa? Como la *fem* está relacionada con la variación del flujo magnético, no importa si lo que cambia es el campo magnético o el área. Un flujo magnético variable puede deberse bien a que el campo magnético varíe o a que varíe el área o a que varíen ambos. También, como el flujo está dado por el producto escalar de campo por área, dicho flujo puede variar por cambio en la orientación relativa de ambos.

11.2 Espira en un campo magnético variable con el tiempo.



Sobre una espira metálica situada en el seno de un campo magnético puede inducirse una *fem* (y, por tanto, una corriente) si el flujo magnético que la atraviesa varía con el tiempo. Como el flujo magnético viene dado por el producto escalar ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$ para un área elemental plana y vector magnético constante en ella) del campo magnético y el vector área (perpendicular al área considerada), el flujo puede cambiar porque cambie el módulo del campo magnético y/o cambie el valor del área del circuito y/o cambie la orientación relativa entre el campo magnético y el área (**posición en metros, intensidad de campo magnético en militeslas, *fem* en milivoltios y tiempo en segundos**). El color del vector indica el valor de la intensidad de campo y los gráficos de la derecha presentan la componente hacia la derecha del campo magnético y la *fem* en función del tiempo.

En la [Animación 1](#) la espira es perpendicular a la pantalla (su vector normal en el plano de la pantalla) mientras que el campo magnético (horizontal y en el plano de la pantalla) apunta inicialmente hacia la derecha. La orientación de la espira es fija en el tiempo mientras que el campo magnético cambia su intensidad de forma oscilante, determinada por los parámetros que puede usted cambiar mediante los cursores deslizantes al efecto: amplitud de la oscilación y frecuencia de la misma.

En la [Animación 2](#) la espira es de nuevo perpendicular a la pantalla y ahora el campo magnético

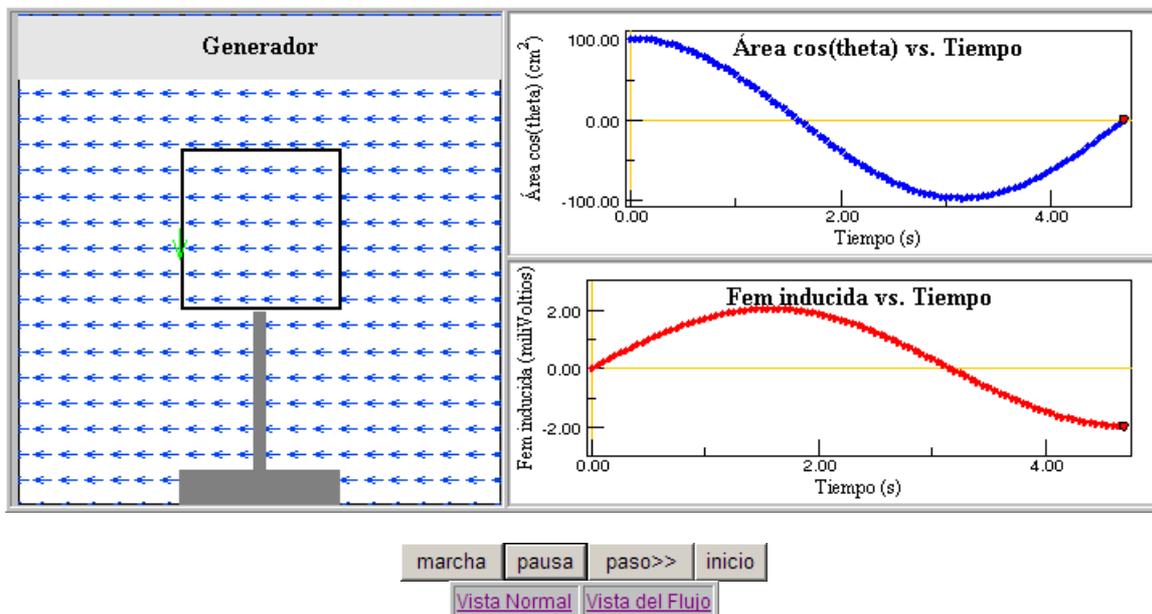
gira en el plano de la pantalla manteniendo constante su módulo. De esta forma, la orientación relativa del campo respecto a la normal a la espira cambia con el tiempo debido al cambio de dirección del campo magnético. Puede utilizar los cursores deslizantes para modificar la intensidad del campo y la frecuencia con que gira su dirección.

Estudie y explique las semejanzas y diferencias existentes entre lo mostrado en ambas animaciones.

En la [Animación 1](#) la intensidad del campo magnético cambia con el tiempo. En la [Animación 2](#) el campo mantiene constante su intensidad (módulo) pero cambia su dirección con el tiempo. A pesar de que estamos ante dos situaciones muy diferentes, si el máximo de $|\mathbf{B}|$ para cada animación es el mismo y también coinciden los valores de frecuencia, en cada instante la componente horizontal del campo magnético es la misma en ambos casos y, por ello, obtenemos la misma fem en función del tiempo. En efecto, en la [Animación 1](#) el campo magnético es en la dirección horizontal y cambia con el tiempo según $\sin(2\pi ft)$. En la [Animación 2](#) el campo magnético mantiene constante su módulo, pero al cambiar su orientación, su componente a lo largo del vector área (horizontal) cambia según $\sin(2\pi ft)$. Por ello, $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$ como función del tiempo es el mismo en ambos casos siempre que los máximos de $|\mathbf{B}|$ y las frecuencias coincidan.

Observe que, aunque $|\mathbf{B}|$ cambia en la primera animación y la orientación de \mathbf{B} cambia en la segunda animación, se supone en ambos casos que el campo magnético, en un instante dado, es uniforme en toda la espira. Por ello podemos seguir calculando el flujo como $\mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$.

11.3 Generador de corriente eléctrica.



La animación muestra una espira giratoria en el seno de un campo magnético constante. La espira puede girar accionada por un motor o por una turbina y el campo magnético puede estar creado por un imán permanente o por un electroimán; no se muestra ninguno de los dispositivos citados. Como resultado tenemos que se induce una fem en la espira y, con ello, una corriente. El giro de la espira, con eje vertical, se destaca mediante una superficie vista que varía con el tiempo y por colores diferentes (rojo y negro) para los lados anterior y posterior (**posición en centímetros, intensidad de campo magnético en teslas, fem en milivoltios y tiempo en segundos**). Sobre la espira se dibuja una flecha en verde que indica el sentido de la corriente inducida.

Consideremos la [Vista Normal](#). El gráfico superior muestra $A \cos(\theta)$, el producto del área, A , de la espira por el coseno del ángulo, θ , formado por el campo magnético y la normal a la espira. El

gráfico inferior muestra la fem inducida en la espira en función del tiempo.

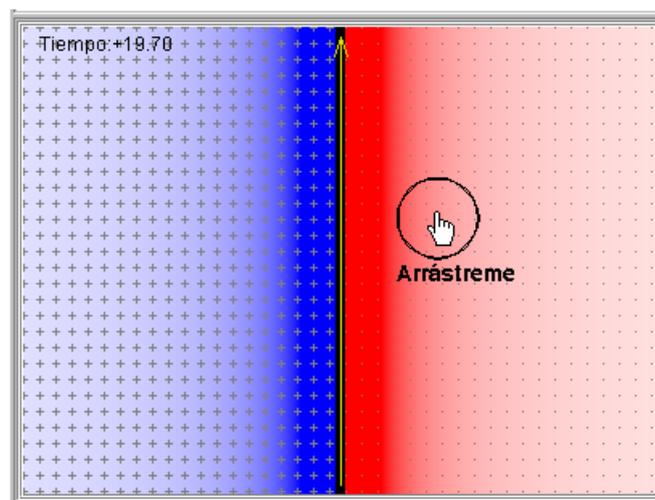
¿Cuál es la posición de la espira cuando el valor absoluto de $A \cos(\theta)$ es máximo? ¿Y cuál cuando dicho valor es mínimo? ¿Cuánto vale la fem inducida en la espira? Observe que cuando la espira está justo perpendicular a la pantalla (sólo se ve un rectángulo delgado), $A \cos(\theta)$ es máximo en valor absoluto. Dada la orientación supuesta del campo magnético, en esta animación cuando el vector área apunta hacia la izquierda el $\cos(\theta) = +1$, mientras que cuando apunta hacia la derecha $\cos(\theta) = -1$. Cuando la espira está justo en el plano de la pantalla (su normal sale o entra perpendicularmente en la pantalla) el $\cos(\theta) = 0$. Por su parte, la fem está dada por la pendiente cambiada de signo del gráfico de $A \cos(\theta)$ frente al tiempo. ¿Por qué?

Pasemos ahora a la [Vista del Flujo](#). Los gráficos muestran ahora el flujo a través de la espira y la fem inducida como funciones del tiempo. ¿Cuál es la posición de la espira cuando el flujo, en valor absoluto, es máximo? ¿Y cuál cuando dicho valor es mínimo?

El flujo es el producto escalar entre los vectores \mathbf{B} y \mathbf{A} , es decir, $BA \cos(\theta)$ cuando el campo magnético es constante en todo el área de la espira que se supone plana (si el campo magnético no es uniforme en la superficie que se apoya bordeada por la espira, debemos utilizar una integral para definir el flujo). Por tanto, al ser \mathbf{B} un campo constante, cuando $A \cos(\theta)$ es máximo ($\cos(\theta) = 1$) así lo es el flujo. Cuando $A \cos(\theta)$ sea mínimo ($\cos(\theta) = -1$), así lo será el flujo. Por lo mismo, cuando $A \cos(\theta)$ sea cero, el flujo será cero. Al ser proporcionales, en nuestro caso, los gráfico de flujo frente a tiempo y de $A \cos(\theta)$ frente a tiempo, se explica la relación entre el gráfico de $A \cos(\theta)$ y fem en la animación de [Vista Normal](#).

En las plantas productoras de energía eléctrica, las turbinas generan corriente basadas en el principio que hemos analizado. O bien hay un conjunto de espiras que giran en un campo magnético uniforme o, más frecuentemente, se hace girar un imán en las proximidades de un conjunto de espiras estacionarias. En Europa las turbinas dan 50 revoluciones por segundo y esto marca la frecuencia de 50 Hz de la electricidad que consumimos en el ámbito familiar e industrial. En Estados Unidos las turbinas giran a 60 revoluciones por segundo, lo que genera electricidad con frecuencia de 60 Hz.

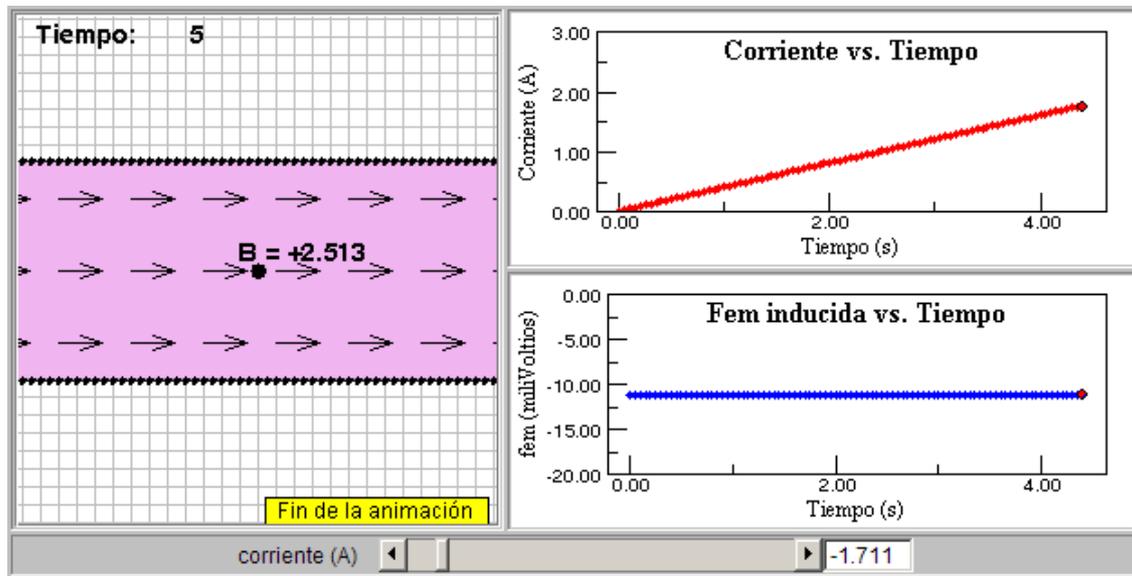
11.4 Espira próxima a alambre.



Tenemos una espira que se encuentra en las proximidades de un alambre que lleva una corriente (hacia arriba). Puede mover la espira (**posición en metros, intensidad de campo magnético en militeslas, fem en milivoltios y tiempo en segundos**). En el gráfico se muestra el flujo a través de la espira así como la fem inducida en función del tiempo. La animación se parará al llegar a los 30 s.

- ¿Cómo cambia el flujo a través de la espira cuando usted la acerca o la aleja del alambre recto portador de corriente?
- ¿Cómo cambia el flujo cuando mueve la espira paralelamente al alambre recto?
- ¿Hay diferencias para el flujo y fem inducidas de tener la espira a la derecha o a la izquierda del alambre recto? Explíquelo.

11.5 Autoinducción.



Se muestra en la animación la sección transversal de un solenoide (piense en un tubo largo cortado a lo largo por un plano que contiene al eje). Los puntos negros representan las espiras que llevan corriente que entra por un lado y sale por el otro, perpendicularmente al plano del dibujo. Las flechas indican la orientación e intensidad del campo magnético (ahora la intensidad mediante el tamaño de la flecha, no por colores). Se incluye también una sonda (punto negro) para medir la intensidad del campo en los diferentes puntos (**posición en centímetros, intensidad de campo magnético en militeslas, $10^{-3} T$, y corriente en amperios**).

Puede modificar el valor de la corriente, bien [cambiando la corriente mediante un cursor deslizante](#) o bien en forma automática generando una [variación lineal de la corriente con el tiempo](#).

La Ley de Inducción Electromagnética nos dice que se genera una fem cuando una espira es atravesada por un flujo magnético que varía con el tiempo. Pero, ¿qué ocurre cuando el flujo magnético que la atraviesa es debido a su propia corriente? No hay diferencia, si hay enlazado un flujo magnético variable se inducirá una fem , no importa el origen del flujo magnético considerado. Como la fem se opone a la causa que la genera (flujo cambiante), cuando por una espira pasa una corriente variable en ella se inducirá una fuerza contra electromotriz.

Al venir dado el flujo en términos del campo magnético y ser éste proporcional a la corriente que lo produce, el flujo será a su vez proporcional a la corriente. Al coeficiente de proporcionalidad, cuando consideramos la situación en que un circuito induce sobre sí mismo, se le denomina coeficiente de autoinducción o simplemente autoinducción. Suele representarse por la letra L y su unidad (SI) es el henrio (H): $\Phi = L I$ que, por la Ley de Inducción Electromagnética, nos dirá que $fem = - d\Phi/dt = - L dI/dt$.

Inicie la animación en que [cambia la corriente por un cursor deslizante](#). En lugar de considerar sólo una espira, consideraremos un conjunto de espiras formando un solenoide. Es más fácil calcular su

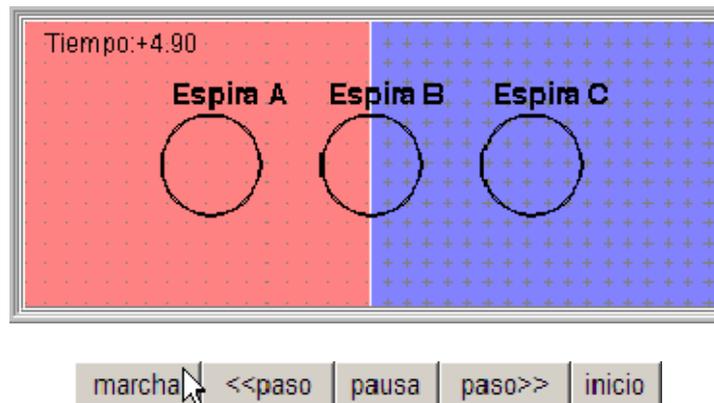
campo magnético y, cuando se tienen varias espiras en serie, la *fem* total es la suma de las *fem* inducidas en cada espira.

- Para el solenoide dado, ajuste la corriente con el cursor deslizante y estudie cómo varía el campo magnético con la corriente.
- Para este solenoide y a partir del dato de campo magnético para un valor dado de la corriente, ¿cuánto vale el número de espiras por unidad de longitud arrolladas para formar el solenoide?

Inicie ahora la animación con [variación lineal con el tiempo de la corriente](#).

- ¿Cuál es el valor de la *fem* inducida?
- Partiendo de que $fem = -L \, di/dt$, ¿cuál será el valor de la autoinducción del solenoide?
- Demuestre que, para un solenoide con N vueltas, $L = (\Phi/I) N$, siendo Φ el flujo por una espira.
- Demuestre, entonces, que la autoinducción de un solenoide puede expresarse como $\mu_0 N^2 A / (longitud)$, siendo N el número total de espiras arrolladas en la *longitud* del solenoide que tiene una sección transversal A . El número de espiras por metro es $N/(longitud)$, que habrá determinado en (b).
- Si nuestro solenoide tiene 2 m de longitud, calcule la autoinducción, L , y compare con lo obtenido en (d).

11.6 Determinar la dirección de la corriente.

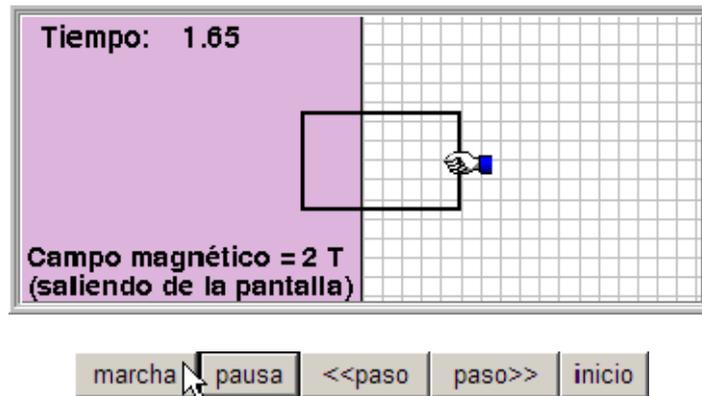


Se muestran tres espiras situadas en regiones de campo magnético variable con el tiempo (**posición en metros y tiempo en segundos**). En rojo se indica cuando el campo magnético sale perpendicularmente a la pantalla y en azul cuando penetra. La intensidad del color representa la intensidad del campo magnético. Para cualquier instante dado de tiempo los campos representados en azul y rojo tienen el mismo módulo.

Para cada uno de los instantes siguientes, diga si hay corriente en cada espira (A, B, C) y, en caso de haberla, diga si circula en sentido horario o antihorario. Explíquelo.

- $t = 0.5$ s.
- $t = 3.1$ s.
- $t = 4.0$ s.

11.7 Fuerza sobre una espira.

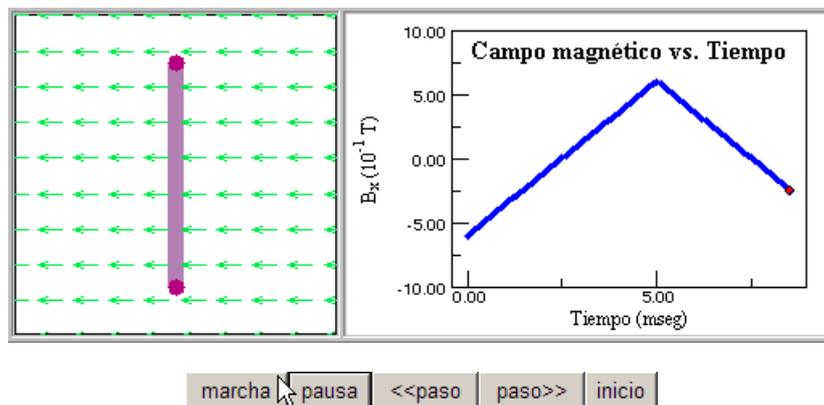


Se tira de una espira, con resistencia de $200\ \text{ohmios}$, sacándola con velocidad constante de una región donde hay un campo magnético de $2\ \text{T}$ que sale perpendicularmente de la pantalla (**posición en metros y tiempo en segundos**).

Durante el tiempo mostrado en la animación,

- ¿Cuál es el valor y dirección de la corriente circulante en la espira?
- Se precisa una fuerza para sacar a la espira de la región donde hay campo. ¿Puede explicar por qué? (Dibuje un diagrama de cuerpo-libre para la espira y explique el origen de cada fuerza).
- Encuentre el valor de la fuerza que fue preciso aplicar a la espira para sacarla del campo magnético en la animación.
- Describa el movimiento subsiguiente de la espira si se mantuviera la misma fuerza aplicada en la región sin campo magnético.

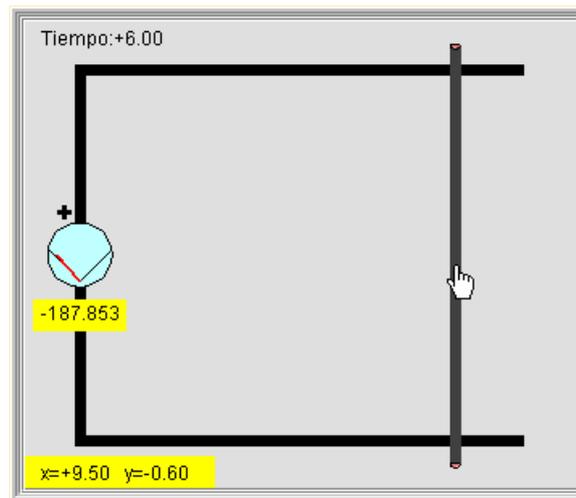
11.8 FEM en la espira.



Se muestra en la animación la sección de una espira circular (sección cortando por un plano que contiene al eje de forma que la espira enlaza la pantalla saliendo y entrando). El gráfico muestra el campo magnético en la dirección x como función del tiempo (**posición en centímetros, tiempo en milisegundos, $10^{-3}\ \text{s}$, y campo magnético en décimas de tesla, $10^{-1}\ \text{T}$**).

- Dibuje un gráfico de la fem inducida en la espira en función del tiempo.
- ¿Cuál es el valor máximo de la fem ?
- ¿Cuál es la dirección de la corriente en función del tiempo (utilice el convenio de que la corriente que sale por arriba es positiva)

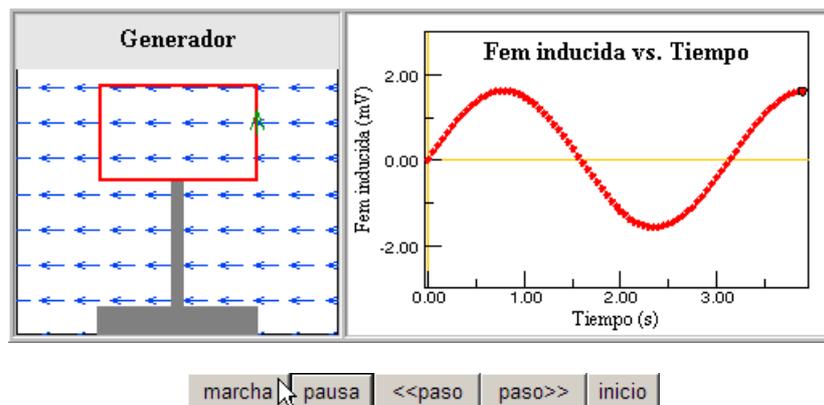
11.9 Determinar la orientación del campo magnético.



La animación muestra la vista desde arriba de un sistema formado por cuatro alambres metálicos (formando una espira con uno de sus lados móvil) y un galvanómetro (**posición en metros y tiempo en segundos**). Hay un campo magnético constante que pasa perpendicularmente a través del área formada por los alambres. Cuando la corriente fluye hacia el terminal +, es decir, en sentido antihorario, la aguja del medidor se desvía hacia la derecha.

Determine el sentido del campo magnético que actúa sobre la espira.

11.10 Campo de un generador.



El gráfico de la derecha muestra la *fem* inducida en una espira giratoria en presencia de un campo magnético (**posición en centímetros, tiempo en segundos y fem en milivoltios**). La flecha dibujada en verde sobre la espira indica el sentido de la corriente por ella circulante.

- ¿Cuál es el valor de la intensidad del campo magnético?
- Si miramos a la espira desde arriba, ¿en qué sentido está girando, horario o antihorario? Explique su respuesta.