

# FUENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO

## 1. Introducción

Después de haber estudiado el campo electrostático, vamos a iniciar en este bloque un nuevo aspecto de la materia en conjunción con el observador que analiza dicho aspecto, éste será el campo magnético estacionario.

Si el siglo XIX fue el apogeo de las máquinas mecánicas y térmicas, como por ejemplo el desarrollo de la maquina herramienta, el siglo XX lo ha sido de las máquinas electromagnéticas. Esto no significa que las máquinas mecánicas estén pasadas de moda sino que las máquinas electromagnéticas controlan cada vez más los procesos de aquéllas (procesos de automatización). Gracias al estudio que vamos a realizar en este tema podremos explicar el funcionamiento de alguna de esas máquinas.

En otro orden de cosas queremos destacar que la investigación científica que llevó a dar una respuesta al problema del electromagnetismo en su conjunto, supuso la culminación de la Física clásica, llegándose al mayor proceso de unificación teórica conocido hasta ahora de la Ciencia, al quedar relacionados dominios científicos tan diferentes como la Mecánica, la Termodinámica, la Óptica, la Acústica, la Electricidad y el Magnetismo.



### A.1 ¿Qué interés puede tener estudiar el tema del campo magnético?

#### Comentario:

El profesor, al igual que se hizo en el tema de campo eléctrico, debe aprovechar la pregunta para resaltar la influencia de esta parte de la Física en la vida de la humanidad. Así el profesor, apoyándose en las contribuciones de los estudiantes, puede referirse a la relación entre el concepto de campo magnético y las ondas electromagnéticas y, en particular, incidir en las aplicaciones tecnológicas de uso diario como la radio, TV, almacenamiento de datos, trenes magnéticos, motores, aparatos médicos, reguladores de tráfico, electrodomésticos, detectores de metales, aparatos de medida, aparatos musicales...



### A.2 Poner y explicar ejemplos del campo magnético.

#### Comentario:

Se trata de utilizar esta cuestión para completar de alguna manera la anterior, con el concurso, ahora, de los grupos de estudiantes que expresarán sus ideas y conocimientos acerca del campo magnético y sus aplicaciones.

El objetivo pues sería observar el grado de conocimiento, aunque sólo sea a nivel memorístico, que los estudiantes tienen acerca de ejemplos que ellos puedan enumerar de campos magnéticos y de posibles aplicaciones, así como de empezar a indagar en las ideas previas, que de este campo tienen los estudiantes.



### A.3 ¿Qué se utiliza para detectar el campo gravitatorio y/o eléctrico? ¿Cómo detectar que hay un campo magnético?

#### Comentario:

Como para averiguar la existencia de un campo en una cierta región del espacio hace falta un “detector”, en esta actividad se plantea la pregunta de qué detectores sencillos empleamos para cerciorarnos de la existencia de diferentes campos en un lugar del espacio.

En una primera toma de contacto sería bueno plantear a los estudiantes que si el campo gravitatorio actúa sobre la masa de los cuerpos y el electrostático sobre su carga, si adivinan o intuyen una norma general para todos los campos de la naturaleza.



En definitiva el objetivo básico de esta actividad es introducir la brújula, si ellos no lo dicen, como elemento análogo a un cuerpo cualquiera en un campo gravitatorio o a una carga elemental en el eléctrico, que funcionan como detectores de campos. Este detector nos va a ser de gran utilidad a lo largo de todo el tema.



### A.4 ¿Cuál es la fuente del campo magnético?

#### Comentario:

Llegados a este punto, se propone a los estudiantes que indiquen cuáles son, a su juicio, las fuentes del campo magnético. Esperando que las respuestas a esta pregunta tan genérica puedan ser dispersas y, en todo caso, de marcado carácter memorístico, el profesor, una vez recogidas diferentes respuestas, planteará a los estudiantes cuestiones como por ejemplo las siguientes:

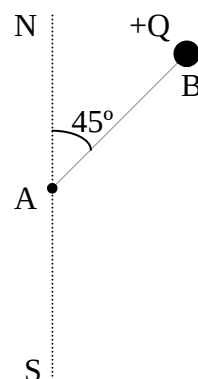


I) Como ya sabes la masa es la causante de que aparezcan campos gravitatorios, ¿cuál es la causa de que se produzcan campos magnéticos? Pon dos ejemplos y explícalos.

II) La línea de trazos de la figura representa la dirección del campo magnético terrestre. En el punto A hay una brújula y en el punto B se encuentra una partícula en reposo cargada con una carga Q positiva.

a) Dibuja sobre A una flecha que represente la orientación de la aguja de la brújula.

b) Explica las razones de tu respuesta



Esta última, como se observa, tiene un carácter más aplicado que la primera. También planteará a los estudiantes si ellos creen que existe alguna relación entre cargas en movimiento e imanes. Aprovechando las contestaciones que se den a la

cuestión II, se reflexionará sobre la necesidad de introducir una nueva fuente en el cuerpo teórico de la Física para explicar determinados fenómenos.

En definitiva, con esta actividad pretendemos constatar cuál es el grado de conocimiento que los estudiantes tienen respecto a las fuentes que, según ellos, son las causantes de los campos magnéticos.

Los problemas aportados y la discusión realizada hasta aquí nos permite establecer el siguiente hilo conductor, establecido a partir de una serie de preguntas, para poder analizar en profundidad el Campo Magnético Estacionario.

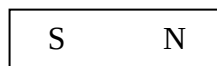
## 2. Imanes e interacción magnética

**A.5** Antes de poner el imán, la brújula está orientada hacia el Norte, (figura a), pero después de poner un imán a su lado, su orientación cambia, (figura b). ¿Cuál será la dirección y sentido del campo magnético creado por el imán?

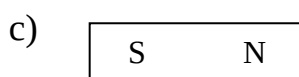
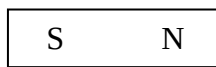
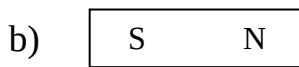
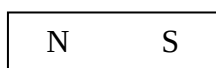
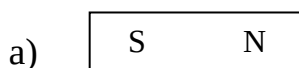
Cuando se da la vuelta al imán, (giro de  $180^\circ$ ), ¿qué dirección tomará la brújula? ¿cuál será la dirección y sentido del campo magnético del imán?



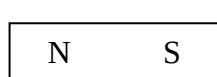
b)



**A.6** ¿Qué sucederá en las siguientes interacciones?



brújula



### Comentario:

Es bien conocido que los imanes fueron hasta el siglo XIX (descubrimiento de Oersted en 1820) la única fuente del campo magnético conocida, pues bien tanto los libros de texto como los profesores en general obvian esta fuente del campo magnético en el estudio del tema de “fuentes del campo magnético”, que seguramente explicaría el porqué de las carencias que presentan los estudiantes de

todos los niveles respecto al conocimiento, comprensión y relación con otras fuentes del campo magnético, de estos materiales.

Como consecuencia de lo anterior, el objetivo que se persigue con la actividad A.5 es triple, por un lado constatar que el imán es fuente del campo magnético, por otro, que según cuál sea el extremo del imán que actúa el sentido de  $\vec{B}$  cambia, y finalmente una primera aproximación a la existencia, también en el magnetismo, de un principio muy importante de la naturaleza como es el principio de superposición, en tanto que hay que explicar la desviación de la brújula como la suma de dos interacciones magnéticas: la terrestre y la del imán.



En lo que se refiere al de la actividad A.6, se trataría de constatar algo que los estudiantes conocen bastante bien: que dos imanes enfrentados por polos del mismo ‘sentido’ se repelen y si de sentido contrario se atraen. También vale para corroborar el principio de superposición del campo magnético [cuestión c)], donde puede esperarse que los estudiantes afirmen que la brújula no se desviará.

En esta actividad se planteará a los estudiantes que expliquen cuál es a su juicio el motivo por el cual los imanes actúan como ellos afirman, con el fin de que se vaya observando cuáles son las ideas previas que los estudiantes tienen al respecto. En este momento el profesor no irá más allá en el análisis del comportamiento de los imanes.

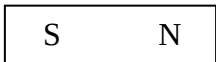


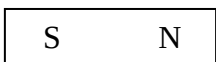
**A.7** Es bien conocido que, al igual que sucedía con la interacción gravitatoria y eléctrica, la interacción magnética atraviesa la materia. Pon un ejemplo.



**A.8.** Supongamos que es  $2.5 \times 10^{-5}$  Teslas la intensidad del campo magnético, en una zona de la Tierra. En esa zona se pone un imán a una distancia de 18.3 cm desde la brújula, y la aguja gira  $60^\circ$  con respecto a la vertical. ¿Cuánto es la intensidad del campo magnético creado por el imán? Si duplicamos la distancia, el ángulo es de  $12^\circ$  respecto a la vertical. ¿Cuánto será ahora la intensidad del campo magnético?

a)   $B_T = 2.5 \times 10^{-5}$

b)    $\theta = 60^\circ$

c)   $\theta = 12^\circ$  

**A.9.** Como habrás comprobado, el campo magnético decrece con la distancia y es plausible suponer, (como sucede en otros campos de la naturaleza), que lo

podría hacer de la forma  $B \cong \frac{1}{d^n}$  donde  $d$  es la distancia y  $n$  un número natural. Basándote en el resultado de la actividad anterior, ¿cuanto valdría  $n$ ?

### Comentario:

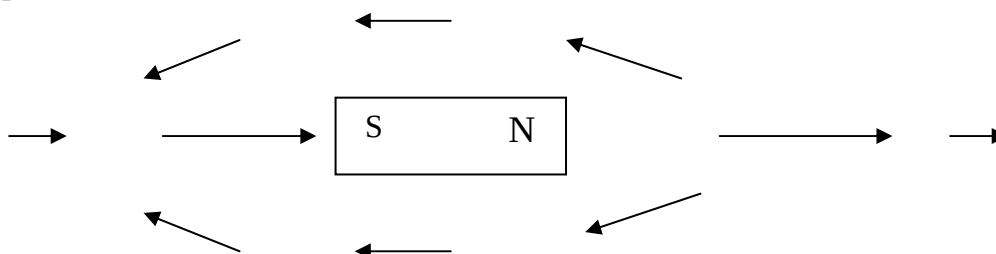
En estas dos últimas actividades se plantea una situación práctica sencilla, a través de la cual los estudiantes van a tener la oportunidad de manejar diferentes aspectos de la metodología científica: se hace un análisis del valor del campo respecto de la variable distancia, más tarde se analizan los resultados obtenidos y, finalmente, se valora la hipótesis previamente emitida.



En consecuencia, se deduce que el objetivo de esta doble actividad es observar cualitativa y cuantitativamente la dependencia del campo que crea un imán con su distancia al centro. Esto nos servirá, más adelante, para compararlo con el campo que crea una espira en su eje, fenómeno al que se va a prestar atención más adelante.



**A.10** Supuesto que tanto el imán de la figura, como la brújula que detectará el campo, se hayan colocado de manera que el  $\vec{B}$  del imán sea perpendicular al  $\vec{B}$  de la Tierra, se ha comprobado experimentalmente que el campo que crea el imán en diferentes lugares, es el que se muestra en la figura. Teniendo en cuenta este resultado, dibuja, (razonándolo), cómo serían las líneas de campo de ese imán.



### Comentario:

En este tema se parte del hecho de que los estudiantes han visto y manejado ya el concepto de líneas de campo, al menos cuando han analizado el campo electrostático. Sin embargo hay estudios que han detectado el hecho de que los estudiantes asignan a las líneas de campo la misión de crear el campo, en una confusión en la que se invierte la causa y el efecto. Ante esta situación hemos planteado una actividad en la que el estudiante observa en primer lugar que el imán crea un campo en el espacio que le rodea representándolo por un conjunto de vectores (causa) y en segundo lugar se le pide que dibuje las líneas de campo, que serían coherentes, en función de la definición de líneas de campo, con dicho campo, subrayando la función meramente representativa (de una forma mucho más cómoda que los vectores del campo) de dichas líneas.

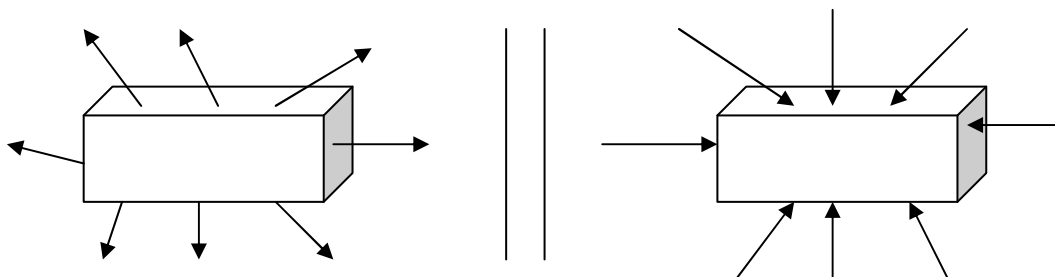


El objetivo de esta cuestión, que va a ser recurrente, pues lo haremos también con otras fuentes del campo, es que el estudiante sea capaz de “visualizar”

las líneas de campo cuando se conocen los vectores campo, (tanto en intensidad como en dirección y sentido), en determinados lugares del espacio que rodea a la fuente y ver si domina y entiende el concepto de líneas de campo, fundamental para luego manejar el concepto de flujo.



**A.11** Nunca se ha encontrado que un imán haya creado un campo magnético cuyo “mapa” de líneas de campo fuese como los mostrados en la figura.



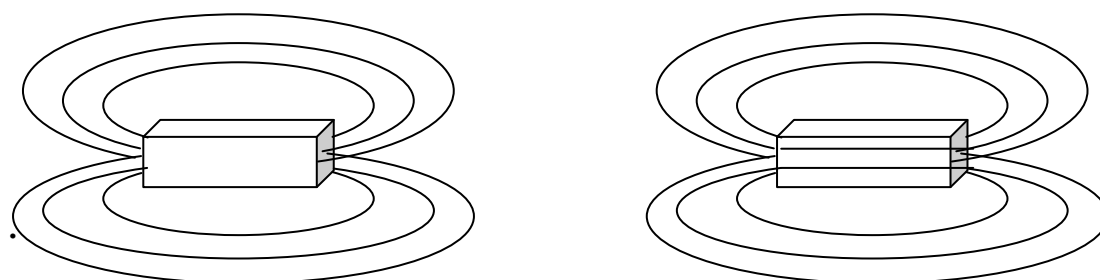
¿Qué conclusión podrías sacar acerca de este hecho de la naturaleza?

#### Comentario:

Suele ser muy habitual que los textos postulen la inexistencia de monopolos en la naturaleza, dentro de un esquema de introducción ‘aprobática’ del campo magnético. Pues bien, en esta actividad se pretende que sean los propios estudiantes los que lleguen a la conclusión, o por lo menos a lanzar la hipótesis, de esa inexistencia. Para ello el profesor utiliza el supuesto conocimiento de los estudiantes respecto del concepto de líneas de campo y de lo que se ha analizado en el estudio del campo electrostático. Por otro lado es una buena ocasión para empezar a reflexionar acerca de lo que va a ser un elemento capital en el estudio de este tema como es el de las analogías y, sobre todo, diferencias entre el campo electrostático y el magnético estacionario.



**A.12** Las líneas de campo de un imán, ¿también recorren su interior? ¿Cuál de las dos figuras es correcta? ¿Cómo podrías justificarlo?



#### Comentario:

Es notorio que muchos libros de texto dibujan las líneas de campo asociadas a un imán exclusivamente por el exterior de éste. Esto puede dar lugar a equívocos, de diferente índole. Por ejemplo a pensar que en el interior del imán no existen líneas de campo y, en consecuencia, campo. Por otro lado, se podría entender que las líneas de campo salen en el polo Norte y entran en el polo Sur de

forma estrictamente equivalente a lo que sucede con las cargas positivas y negativas, respectivamente, en electrostática.

En ese sentido esta actividad estará directamente relacionada con la anterior en tanto que una forma de demostración es la inexistencia de monopolos y por lo tanto la imposibilidad de la aparición de estos cuando partimos un imán en pedazos, de manera que las líneas de campo externas para el pedazo pequeño se convierten en internas para el mayor. En cuanto al segundo déficit apuntado estaría intimamente unido a un posible déficit en el teorema de Gauss del campo magnético.



**A.13** Teniendo en cuenta cómo son las líneas de campo de un imán, ¿cuánto valdría el flujo magnético a través de cualquier superficie cerrada que confinara a dicho imán? En base a lo anterior, y recordando, también, la expresión del teorema de Gauss para el campo eléctrico, ¿cuál crees que sería el enunciado del teorema de Gauss en el campo magnético estacionario? ¿Cómo interpretarías el resultado obtenido?

#### Comentario:

Esta actividad completa, de alguna manera, las dos anteriores con las que está relacionada. En dichas actividades se ha comprobado que las líneas de campo son cerradas y que no existen monopolos. Además, se parte del hecho de que los estudiantes conocen el teorema de Gauss para el campo electrostático. Se está pues ante la situación idónea para introducir en este momento el análisis del teorema de Gauss para el campo magnético y conseguir de los estudiantes un aprendizaje significativo de dicho teorema.



Los estudiantes deberían llegar a la conclusión que la inexistencia de monopolos está relacionado con el hecho de que las líneas de campo sean cerradas y que el flujo, a través de cualquier superficie cerrada, valiese cero. Relacionado con ello deberían advertir que el teorema de Gauss, en el ámbito del campo magnético estacionario no nos va a ser útil para el cálculo de dicho campo.



### 3. ¿Existen otras fuentes de campo magnético estacionario distintas a los imanes?

Hasta ahora hemos analizado una de las fuentes del campo magnético como son los imanes. Nuestro siguiente paso va a consistir en reflexionar acerca de otra fuente del campo magnético distinta, aparentemente, de la de los imanes.



**A.14** Aparte de los imanes, ¿conoces otras fuentes del campo magnético? Pon ejemplos y explícalos.

**Comentario:**

En esta actividad se deja a los estudiantes que expongan sus ideas al respecto y que se impliquen en la tarea que vamos a realizar. Posteriormente, y para acotar el tema el profesor propone situaciones más concretas, que podrían ser del estilo de la siguiente:

¿Una barra cargada con una carga  $Q$  hará girar una brújula colocada en sus proximidades? Explica tu respuesta lo más detalladamente posible.



En definitiva, se trata de ver si los estudiantes conocen, y se les pide que las expliciten, otras fuentes, alternativas al imán, del campo magnético, esperando que no tengan dificultad en reconocer como tales la intensidad de corriente, las cargas en movimiento...



**A.15** Supongamos una carga móvil que se mueve en el espacio, ¿de qué dependería, y de qué forma lo haría, el campo magnético creado? ¿Cuánto valdría dicho campo? Ley de Biot y Savart.

**Comentario:**

Una vez que se ha reflexionado en la actividad anterior respecto de la posibilidad de creación de campos magnéticos por cargas móviles, se iniciará una aproximación a la llamada ley de Biot y Savart pero desde un tratamiento más científico. Así, los estudiantes realizarán una hipótesis de variables con respecto a que variables son las que influirán en la creación de ese campo y de qué manera; deberán llegar a plantear que depende de la carga, de la distancia (como en otros campos de la naturaleza) y en este caso de la velocidad de la carga. Una vez conseguido esto el profesor planteará a los estudiantes una reflexión acerca de la velocidad de la carga con el ánimo de averiguar qué es lo que piensan los estudiantes con el objetivo de conocer sus ideas.



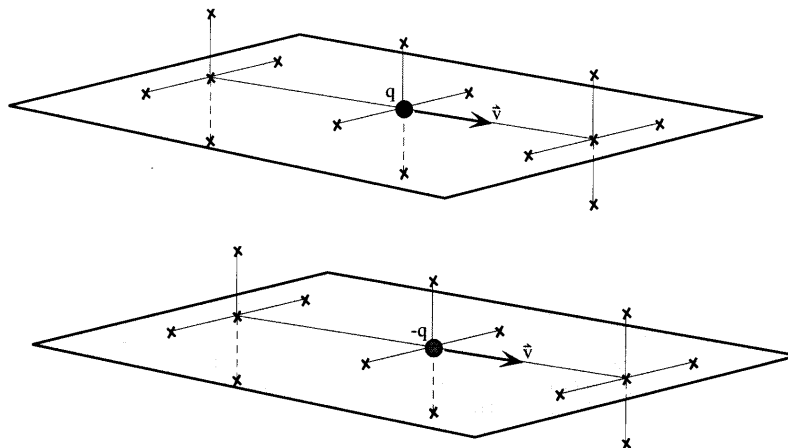
Llegado a este punto, sería ya el profesor el que mostraría a los estudiantes la expresión matemática que la comunidad científica se ha dado (ley de Biot y Savart) para calcular el campo magnético creado por una carga que lleva una velocidad constante, respecto de un observador inercial.





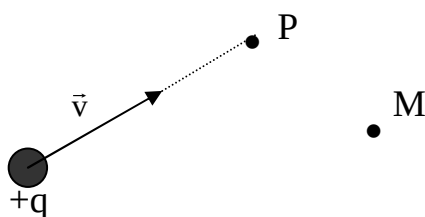


**A.16** a) Utilizando la ley de Biot y Savart, dibuja en cada punto señalado en las dos figuras, el campo magnético.



b) Dibuja las líneas de campo. (Puedes utilizar la figura anterior).

c) Observa la siguiente figura y di, explicándolo, si existe alguna diferencia relevante entre los campos magnéticos en los puntos: P y M.



**A.17** ¿Cuánto valdrá el campo magnético de una carga que esté parada?



**A.18** Teniendo en cuenta los conocimientos del concepto de intensidad de corriente, vistos en temas anteriores, así como la ley de Biot y Savart, ¿cuál sería el campo magnético creado por un conjunto de  $n$  cargas móviles dentro de un conductor ('elemento de corriente')?

#### Comentario:

En esta actividad, que el profesor orientará y reformulará, se supondrá que los estudiantes tienen ya conocimientos del concepto de intensidad de corriente que en un curso normal de electromagnetismo se ha visto con carácter previo.

Por lo tanto, basándose en los conocimientos que los estudiantes deberían tener del concepto de corriente, el objetivo de esta actividad sería pasar del estudio del campo que crea una carga móvil al que crea un elemento de corriente,



(históricamente no fue así). Es una cuestión eminentemente matemática y requerirá la ayuda explícita del profesor. En todo caso, convendría señalar que el proceso que se hace, de forma análoga a la ley de Coulomb, para cargas aisladas, no se podría, en sentido estricto, realizar así; ello es consecuencia de que no se pueden aislar ‘elementos de corriente’. Lo que realmente la física ha demostrado es que el campo que crea un hilo, por un lado, y el que crearía ese hilo si lo considero formado por infinitos elementos de corriente y sumamos todos los campos de cada elemento de corriente, calculados como lo hacemos en esta actividad, daría lo mismo; ese es el motivo por el que, en la práctica, el proceso se pueda hacer como lo explican, en general, los libros de texto.



**A.19** Calcula el campo magnético creado por un hilo de corriente recto y finito:

- a) Realiza una hipótesis de variables, antes de calcularlo.
- b) Una vez hecho el cálculo, (*sugerencia: aplica el principio de superposición, así como el resultado de la actividad anterior*), analiza el resultado obtenido y reflexiona sobre dicho resultado para dos casos particulares
  - b.1) Cuando me sitúo muy cerca del hilo.
  - b.2) Si me pongo en la mediatriz del hilo, ¿qué sucede si me sitúo a una distancia muy grande en comparación con la longitud del hilo?

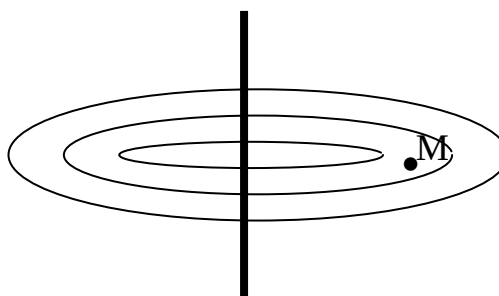
#### Comentario:

Esta actividad es, de alguna forma, la generalización de la anterior, que en lo que se refiere a la demostración matemática será realizada por el profesor, aunque antes de realizar esta aproximación matemática los estudiantes deben ser capaces de analizar las posibles variables de las que pudiera depender el campo y la forma en la que lo harían. Hay que hacer ver a los estudiantes que el cálculo de este campo no es algo que sólo tenga un valor académico sino que tiene trascendencia desde el punto de vista tecnológico. También será muy importante en el desarrollo de esta actividad analizar el resultado obtenido y cotejarlo con las hipótesis previas apuntadas por los estudiantes, aunque en este capítulo de realizar un análisis final cobrará especial importancia reflexionar sobre los dos “casos límite” que se plantean en los subapartados b.1), hilo infinito, y b.2), elemento de corriente.



**A.20** a) ¿Existe algún error, o es correcto el siguiente ‘mapa’ de líneas de campo creado por un hilo de corriente? Razónalo. (Las líneas se han dibujado de manera que el incremento del campo magnético entre cada dos consecutivas sea el mismo)

b) Si pusiéramos una brújula en el



punto M (ver figura), ¿se desviaría de la posición que marca el Norte de la Tierra? Razónalo.

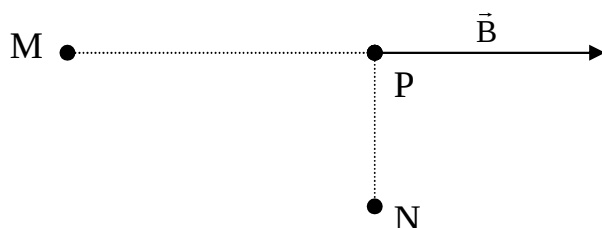
**Comentario:**

Esta actividad persigue corroborar, una vez más, si se tiene claro o no el concepto y las aplicaciones de las líneas de campo como representación del campo magnético, que es como la comunidad científica hoy en día las utiliza

Así pues, los estudiantes deberían decir, con respecto al apartado a), que las líneas de campo deberían estar más separadas cuanto más nos alejemos del hilo, y con respecto al apartado b) deberían confirmar que sí, pues el hecho de que por un punto no se represente una línea de campo no significa que dicho campo no exista en ese lugar.



**A.21** Si en un punto del plano del papel, P, existe un campo magnético  $\vec{B}$ , ver figura, creado por un hilo de corriente que es perpendicular a dicho plano, ¿podría estar el hilo en el punto M? y ¿en el N? ¿Cuál es el sentido de la corriente eléctrica?



**Comentario:**

Ante la dificultad que tienen los estudiantes para manejar magnitudes que tienen direcciones tan “extrañas” y con las que están poco familiarizados (lo que contribuye, con otras causas, a que el estudio magnetismo les sea tan arduo), volvemos a plantearles una actividad donde tienen que trabajar con esas direcciones no centrales.



**A.22** Un conductor rectilíneo, recorrido por una corriente eléctrica origina un campo magnético y sin embargo no engendra un campo eléctrico. ¿Cómo lo justificarías?

**Comentario:**

Existen diferentes trabajos de investigación, donde se constata cómo de forma generalizada, en diferentes niveles de enseñanza evaluados, se atribuían efectos eléctricos a lo que, en realidad, eran efectos magnéticos; en este sentido se observó que la mayoría de los estudiantes afirmaba que un hilo recorrido por una intensidad de corriente producía efectos eléctricos, análogamente a como lo hubiera hecho si hubiese estado cargado electrostáticamente.



En consecuencia, con esta actividad se trata, por un lado, de averiguar hasta qué punto los estudiantes tienen el déficit de asimilar un cuerpo recorrido por una corriente con un cuerpo cargado electrostáticamente y, por otro, hecho ese análisis corregir esa posible equivocación que hunde sus raíces en una comprensión errónea del concepto de corriente eléctrica. Por lo tanto se deberá llegar a entender que un hilo recorrido por una intensidad de corriente es un hilo eléctricamente neutro y por consiguiente no crea un campo eléctrico (obviamos hilos recorridos por intensidades de corriente muy elevadas).



### A.23 Escribe las diferencias y las analogías existentes entre el campo magnético y el eléctrico

#### Comentario:

Una vez realizadas las actividades previas, nos plantearemos como objetivo en esta actividad agrupar las diferencias y las analogías entre los dos campos, haciendo especial hincapié en las diferencias, pues los estudiantes, ante sus carencias en el conocimiento del campo magnético, tienden a confundirlo con el campo eléctrico. En consecuencia deberían llegar a plantear una tabla como la siguiente:

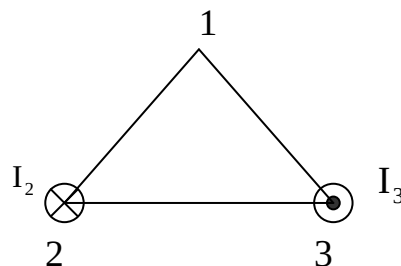


| <b>DIFERENCIAS</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>ANALOGÍAS</b>                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• En el campo <b>B</b> sólo se produce interacción entre algunos materiales. en el <b>E</b> entre todos.</li> <li>• En <b>B</b> las líneas de campo siempre son cerradas; en el <b>E</b> no.</li> <li>• El campo <b>B</b> siempre creado por cargas en movimiento. El <b>E</b> también por cargas en reposo.</li> <li>• Cuantitativamente el campo <b>E</b> es mayor que el <b>B</b>. (Comparar constantes)</li> <li>• El campo <b>B</b> es no central, el <b>E</b> sí lo es.</li> <li>• El campo <b>B</b> actúa sobre cargas en movimiento. El <b>E</b> también sobre cargas en reposo.</li> <li>• <b>B</b> es 'no conservativo'; <b>E</b> es 'conservativo' (opcional en este momento del tema)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• En los dos campos hay atracción y repulsión.</li> <li>• En los dos es válido el principio de superposición.</li> <li>• Interacciones que atraviesan la materia.</li> </ul> |

Con la siguiente actividad comenzamos una serie de ellas, que aparecerán en diferentes momentos del desarrollo del tema, que son situaciones problemáticas, cuyos objetivos son, en general, analizar si todos los conceptos trabajados en las actividades previas, están bien 'asentados' entre los estudiantes, es decir si han llegado a adquirir un conocimiento significativo de los mismos, y si son capaces de manejarlos en situaciones de problemas 'aplicados'.



**A.24** Dos conductores rectos e ilimitados pasan por los vértices del triángulo equilátero de 10 cm de lado. Las corrientes son de 15 A. y las direcciones aparecen en el dibujo. Calcular el campo magnético creado en el vértice 1.

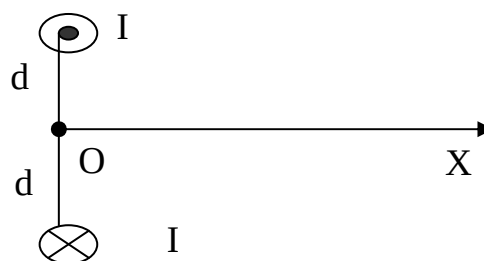


**Comentario:**

Una vez que hemos analizado en profundidad el campo que crea un hilo de corriente (tanto cuando es finito como cuando se puede considerar infinito), se plantea una actividad donde la base fundamental de resolución, además de otros elementos, sea precisamente la aplicación cuantitativa del valor de dicho campo, utilizando para ello los aspectos inherentes al modelo científico.



**A.25.** Dos conductores rectilíneos paralelos y muy largos, separados una distancia  $2d$  transportan corrientes de igual intensidad pero de sentidos contrarios, como se indica en la figura. Calcular:



- El valor del campo magnético, previa hipótesis de variables, en un punto genérico del eje OX.
- Analiza el resultado y calcula su valor máximo y el punto donde se localiza
- Representa gráficamente B en función de x.

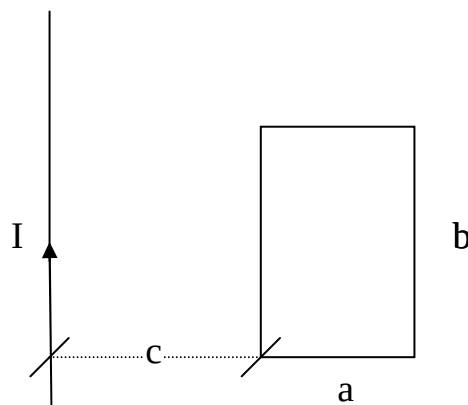
**Comentario:**

Esta actividad viene a complementar la anterior, planteándose ahora otra serie de cuestiones. De nuevo en esta actividad de aplicación nos planteamos cubrir varios objetivos, a saber:

- Modelo de resolución 'científica' (análisis cualitativo, emisión de hipótesis...)
- Estrategia consistente en la aplicación del principio de superposición
- Manejo del lenguaje gráfico, así como el paso del lenguaje gráfico al matemático y viceversa. Este último objetivo es de gran interés para científicos e ingenieros.



**A.26** Un conductor rectilíneo de longitud infinita y sección despreciable, es recorrido por una corriente continua de intensidad I. Calcular:



- El flujo magnético que atraviesa el rectángulo de la figura, previa emisión de hipótesis de variables.
- Analiza el resultado obtenido.

### Comentario:

En esta actividad se conjuga el campo creado por un hilo con el flujo que atraviesa una superficie abierta en forma de espira rectangular.

Los estudiantes tendrán que llegar a vislumbrar que el flujo dependerá de la siguiente forma  $\phi = f(a, b, I, c, \mu)$  valorando de qué manera depende de cada una de las variables. La actividad tiene una dificultad matemática añadida en tanto que el campo que crea el hilo varía con el inverso de la distancia y, en consecuencia, el flujo que atraviesa la espira no es constante en cada elemento diferencial de área de la misma, con la dificultad de tipo integral que ello conlleva



Veamos, de forma detallada, cómo podrían ser los diferentes pasos a realizar en la resolución de la actividad.

Teniendo en cuenta la definición de flujo, una hipótesis plausible podría ser:

a)

Si  $a \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  pues aumentaría el área de la que depende

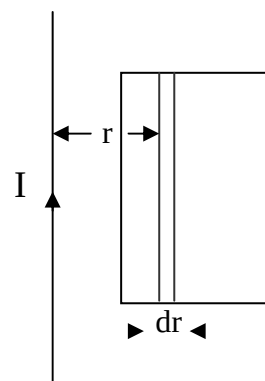
Si  $b \uparrow$  pasaría lo mismo y por idéntico motivo

Si  $I \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  pues  $B$  aumentaría y, en consecuencia, el flujo magnético también

Si  $c \uparrow \Rightarrow \Phi \downarrow$  ya que si la distancia a la fuente aumenta el  $B$  disminuiría y entonces  $\Phi \downarrow$

Si  $\mu \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  porque el campo magnético es siempre directamente proporcional a  $\mu$   
 $\Rightarrow$  el  $\Phi \uparrow$  pues depende del campo

Por otro lado, y para calcular el flujo, hay que tener en cuenta que el campo que crea un hilo no es constante y, por tanto, tendremos que utilizar necesariamente el cálculo diferencial e integral. Dividiremos la espira en ‘franjas’ diferenciales, (ver figura), calcularemos la  $d\Phi$  a través de cada franja y luego integraremos convenientemente:



$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S \frac{\mu_0 I}{2\pi r} b dr = \int_c^{c+a} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{b}{r} dr =$$

$$\frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \frac{c+a}{c} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln [1+(a/c)]$$

b) A la vista del resultado obtenido se corroboran las hipótesis que, con carácter previo, se habían formulado.

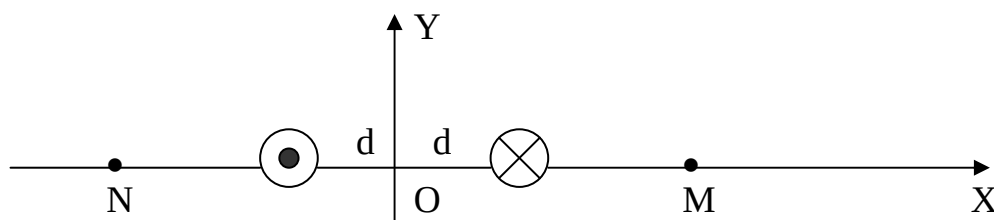


**A.27** a) Calcula el campo magnético de dos cables rectos y largos, por los que pasa la misma intensidad de corriente  $I$  en sentidos opuestos (separados entre sí una distancia  $2d$ ), en los puntos  $M$  y  $N$  (ver figura).

b) Si M y N están muy alejados de los hilos, cuánto valdría ahora el campo magnético en dichos lugares.

c) Comparándolo con el caso anterior (el b), ¿ves alguna diferencia con respecto al caso en el que el campo lo hubiera creado uno sólo de los dos hilos?

d) ¿Por qué crees que en sistemas de comunicación, como en redes telefónicas o de computadores, el cableado se dispone de manera que el conductor que lleva una señal y el que lleva la señal de regreso están el uno al lado del otro e incluso entrecruzados?



#### Comentario:

Con esta actividad se pretende que los estudiantes analicen los resultados obtenidos en las diferentes preguntas y puedan sacar conclusiones que tienen interés no sólo académico sino de aplicación tecnológica, puesto que del análisis de los resultados se puede deducir que dos hilos que estén próximos o incluso entrelazados, generan un campo magnético que es menor que el crearía un sólo hilo (concretamente el campo de un hilo depende inversamente con la distancia y el de dos con el cuadrado de dicha distancia), minimizando, por lo tanto, los posibles efectos perniciosos que ese campo magnético tendría sobre otros elementos que tuviera a su alrededor (como por ejemplo un hilo de corriente que llevara una cierta información codificada).

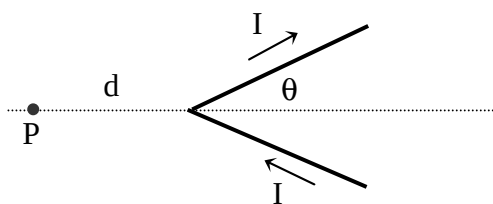


**A.28** A comienzos del siglo diecinueve el campo magnético creado por alambres de corriente fue foco de atención en la investigación en Física, tanto teórica como experimental. Un interesante caso particular es el de un hilo muy largo que transporta una determinada corriente y que ha sido doblado en forma de “V”, con un ángulo de apertura  $2\theta$ . Según las mediciones realizadas por Ampère, la magnitud del campo magnético en un punto P exterior a la “V”, sobre su eje de simetría y a una determinada distancia de su vértice, es proporcional a  $\tan(\theta/2)$ . Sin embargo, Biot y Savart sugirieron que el campo en P debería ser proporcional al ángulo  $\theta$ . ¿Quién tenía razón? Para determinarlo, puedes centrar tu análisis en las variables que afectan al campo magnético creado por el hilo y valorar, en especial, algún caso límite de la variable  $\theta$  y contrastar si se cumplen las propuestas realizadas por los científicos.

### Comentario:

Presentamos ante los estudiantes, como situación problemática a resolver, un desacuerdo histórico entre científicos que realizaron aportaciones fundamentales al desarrollo del electromagnetismo y, en el caso que nos ocupa, al descubrimiento de las leyes que rigen las fuentes del campo magnético. Tiene, por tanto, un enfoque CTS. Desde el punto de vista metodológico, su resolución requiere, por un lado, valorar el rango de aplicabilidad de estrategias habitualmente utilizadas en situaciones de apariencia similar y, por otro, hacer ver a los estudiantes que la ciencia, en ocasiones, aborda los problemas que se le plantean considerando situaciones particulares de más fácil interpretación cualitativa. La valoración de casos límite de la variable angular es, precisamente, el camino más sencillo y alejado de complejos cálculos para determinar si tenía razón Ampère o Biot y Savart. Estos aspectos procedimentales, la valoración de la estrategia, la emisión de hipótesis y la consideración de casos límite, resultan en este contexto ricos en significado y de gran valor didáctico. Veamos cómo abordar la situación:

*¿Cómo podemos esquematizar la situación descrita en el enunciado?*



Podríamos pensar, en principio, que como el hilo es infinito y que como al doblarlo en “V” podría considerarse formado por dos semihilos infinitos, el campo en P sería, según el principio de superposición, la suma de los campos creados por los dos semihilos infinitos, cada uno de los cuales podría obtenerse por separado haciendo uso

de la expresión  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ .

Sin embargo, la distancia  $r$  en esta expresión representa la distancia perpendicular del punto P al hilo infinito, mientras que, en nuestro caso, la distancia  $d$  es otra. Esta estrategia de resolución ya utilizada en otras situaciones problemáticas, no parece ser válida en nuestro caso.

*¿Podemos adelantar de qué variables dependerá el campo magnético en cuestión?*

Si aumentamos la corriente, aumentamos la intensidad de la fuente del campo magnético por lo que éste se hará mayor.



La interacción magnética disminuye con la distancia a la fuente, así, a mayor  $d$  menor campo.

La permeabilidad del medio es un factor que altera el campo. En nuestro caso consideraremos el aire y, por tanto, constante.

En cuanto al ángulo  $\theta$  apreciamos que su variación aproxima o aleja el hilo en “V” al punto P. Si aumentamos  $\theta$  (y mantenemos la forma en “V” de ángulo  $2\theta$ ) los hilos se acercan a P por lo que el campo aumentará.

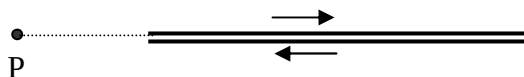


En definitiva,  $B_P = B_P(I, d, \mu_0, \theta)$ .

*¿Cómo podremos juzgar cuál de las propuestas del enunciado era la correcta?*

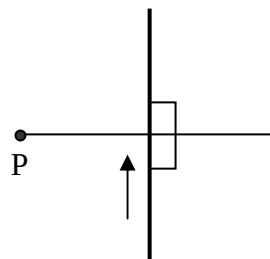
Con el propósito de orientar la resolución del problema puede ser interesante analizar algunos valores límite del ángulo de apertura  $2\theta$  de la “V” pues, al fin y al cabo, en la relación del campo con esta variable discreparon los científicos.

Si  $\theta \rightarrow 0$  ( $2\theta \rightarrow 0$ ). Nos encontramos ante dos hilos paralelos muy próximos entre sí que llevan corrientes iguales y opuestas cuya línea de acción pasa por P. Según esta última característica, cabe esperar que su efecto en ese punto sea nulo. Sin embargo, las dos propuestas cumplen esta condición límite:



Ampère:  $B_P = K_A \cdot \tan(\theta/2)$ ; Si  $\theta \rightarrow 0$ , entonces,  $\tan(\theta/2) \rightarrow 0$  y  $B_P \rightarrow 0$   
 Biot y Savart:  $B_P = K_{BS} \cdot \theta$ ; Si  $\theta \rightarrow 0$ , entonces,  $B_P \rightarrow 0$

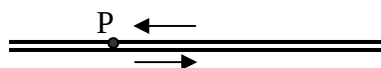
Si  $\theta \rightarrow \pi/2$  ( $2\theta \rightarrow \pi$ ). La “V” se convierte en un alambre de corriente rectilíneo e infinito. Para este caso, la magnitud del campo magnético en P es conocida y vale  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$ . Ahora bien, tomando una constante de proporcionalidad adecuada, ambas propuestas pueden ajustarse a la expresión del campo en aquella época generalmente aceptada:



Ampère:  $B_P = K_A \cdot \tan(\theta/2)$ ; Si  $\theta \rightarrow \pi/2$ , entonces,  $\tan(\theta/2) \rightarrow 1$  y  $B_P \rightarrow K_A$ ,  
 luego,  $K_A = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$ .

Biot y Savart:  $B_P = K_{BS} \cdot \theta$ ; Si  $\theta \rightarrow \pi/2$ , entonces,  $B_P \rightarrow K_{BS} \cdot \pi/2$ , luego,  $K_{BS} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \frac{2}{\pi}$ ,  
 es decir,  $K_{BS} = \frac{\mu_0 I}{\pi^2 d}$ .

Si  $\theta \rightarrow \pi$  ( $2\theta \rightarrow 2\pi$ ). El punto P se encuentra entre los dos alambres que transportan corrientes iguales en sentido contrario y está infinitamente próximo a ellos. Por tanto, los hilos crean en P campos muy grandes y del mismo sentido. Es decir, el campo en P tenderá a infinito. Como  $\tan(\theta/2) \rightarrow \infty$  cuando  $\theta \rightarrow \pi$ , la expresión de Ampère parece ser la correcta y, hoy en día, es universalmente aceptada. Por contra, la expresión propuesta por Biot y Savart no puede ser correcta pues supone un valor finito del campo para esta situación especial.



Podemos concluir entonces, que el campo en P en la situación descrita en el

$$\text{enunciado será: } B_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} \operatorname{tg}(\theta/2)$$

*¿Es coherente el resultado con respecto a las hipótesis emitidas?*

En la expresión matemática obtenida para el campo en P se comprueba que la dependencia de esta magnitud con la intensidad de corriente, con la distancia d y con el ángulo de apertura de la 'V', previamente consideradas son correctas.

*¿Es dimensionalmente homogéneo el resultado?*

De la expresión obtenida concluimos que  $\frac{\frac{\text{T.m}}{\text{A}} \text{A}}{\text{m}} \equiv \text{T}$ , por lo que desde el punto de vista de las unidades, la expresión es coherente.

#### 4. Campo magnético creado por una espira.

**¿Formarían las fuentes del campo magnético estacionario anteriormente analizadas parte de un mismo esquema conceptual?**

El campo magnético creado por un hilo de corriente, en condiciones 'standard', crea campos que desde el punto de vista tecnológico son pequeños, la cuestión, en consecuencia, es reflexionar acerca de cómo poder diseñar 'algo' que engendre campos magnéticos de más alto valor.



**A.29** En un contexto de aumentar el campo magnético, el científico francés L.M. Ampère dobló un hilo de corriente para configurar una espira. Más tarde unió muchas de esas espiras para crear lo que él denominó 'solenoides'. ¿Por qué y para qué crees que se le ocurrió esta idea, que luego resultó ser tan fructífera?

#### Comentario:

El tema a comentar y reflexionar con los estudiantes tiene una doble vertiente. Por una parte, se puede aprovechar para recordar que desde el punto de vista histórico Ampère postulaba que todos los fenómenos electromagnéticos tienen su base en la interacción entre corrientes eléctricas (frente a otras teorías que lo negaban, como por ejemplo la de M. Faraday) y aseguraba que los imanes estaban formados por corrientes eléctricas circulares alrededor de su eje; por eso, diseñó hilos en forma de circunferencia e incluso varias circunferencias enrolladas que



denominó solenoide, para poder realizar diversas prácticas que confirmaran su teoría. Por otro lado, y desde un enfoque más utilitarista se puede reflexionar con los estudiantes acerca de la magnitud habitual de los campos magnéticos creados por hilos, teniendo en cuenta que la constante que aparece en la ley de Biot y Savart es  $10^{-7}$  que es un valor muy pequeño y que si quiero obtener campos más potentes deberemos pensar en otras formas para la fuente del campo magnético. Concretamente si los hilos los doblamos creando espiras circulares las líneas de campo se concentrarán en su interior y el campo será mayor que es lo que pretendíamos.



**A.30** Hallar el campo magnético en el centro de una espira circular de corriente recorrida por una intensidad  $I$  y que tiene un radio:  $R$ . Realiza una emisión previa de hipótesis, respecto de las variables de las que pudiera depender y analiza el resultado obtenido.

**Comentario:**

El fin de esta actividad sería el de calcular, con hipótesis previa de variables, y analizar el campo magnético que crea un cuerpo que desde el punto de vista tecnológico es muy importante: la espira circular. El hecho de empezar por su cálculo en el centro ha tenido un doble objetivo: a) por un lado comenzar por un lugar donde la aplicación de la ley de Biot y Savart es muy sencilla; b) permitir en la cuestión siguiente un análisis de resultados más enriquecedor, además de calcular dicho campo siguiendo dos estrategias diferenciadas.



**A.31** Calcula el campo magnético que crea una espira de corriente en un punto de su eje.

- a) Emite hipótesis de variables
- b) Analiza el resultado observando dos casos particulares:
  - b.1) Cuando la distancia a la que nos situamos es cero.
  - b.2) Cuando la distancia es muy grande comparada con el radio de la espira.
    - b.2.1) ¿Por qué crees que a la cantidad:  $\pi R^2 I$  se le denomina ‘momento dipolar magnético  $\mu$ ’?

**Comentario:**

El profesor orientará acerca de los desarrollos matemáticos, consecuencia de la aplicación de la ley de Biot y Savart, que en este caso tienen una cierta complejidad. Evidentemente este desarrollo matemático se producirá una vez se haya realizado la emisión de hipótesis. Una vez obtenido el resultado, nos detendremos en analizarlo, en un caso para cotejarlo con A.30; pero sobre todo, en el supuesto que nos situemos muy lejos, para poder compararlo con el campo que crea un imán, (en los dos supuestos el campo magnético es inversamente proporcional al cubo de la distancia a la que nos situemos). Asimismo veremos el aspecto que tiene el campo eléctrico de un dipolo eléctrico, y recapacitaremos sobre el porqué del nombre de dipolo magnético (recordar el tema de Potencial Eléctrico) y el comportamiento de los imanes.





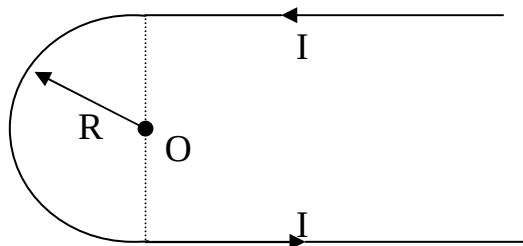
**A.32** ¿Qué diferencia esencial existe entre un dipolo eléctrico y otro magnético?

**Comentario:**

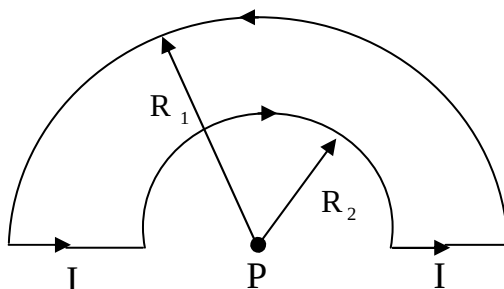
El método de las analogías que se ha utilizado en la actividad anterior es algo que a lo largo de la Historia de la Ciencia (sobre todo a partir del siglo XIX con W.Thomson, J.C.Maxwell,...) permitió que se produjeran avances significativos sobre todo en la teoría de campos. El método consistía en tratar de encontrar ciertas semejanzas físicas entre fenómenos distintos pero regulados por ecuaciones matemáticas equivalentes, teniendo muy claro que la equivalencia sólo se daba entre los modelos matemáticos pero no entre los fenómenos físicos. En ese sentido en la actividad anterior hemos hecho una analogía entre el dipolo eléctrico y una espira de corriente, lo que permite que en la actualidad se le llame dipolo magnético. El objetivo es, dado que a veces la analogía matemática se extrapola a la física (cayendo en una confusión conceptual), que los estudiantes reflexionen sobre la inexistencia de monopolos magnéticos y por lo tanto que vean que no hay una ‘simetría’ física entre lo que llamamos dipolo eléctrico y dipolo magnético.



**A.33** Un hilo conductor muy largo, por el que circula una intensidad de corriente  $I$ , se dobla como se muestra en la figura. Calcular el campo magnético  $\mathbf{B}$  en el punto  $O$  (centro de la semicircunferencia).



**A.34** Calcular el campo magnético que ha creado la corriente  $I$  en el punto  $P$ , que es el centro de las semicircunferencias de radios  $R_1$  y  $R_2$ .



**Comentario:**

Una vez analizados en profundidad los campos magnéticos producidos por un hilo de corriente y una espira, o dipolo magnético, nos hemos propuesto, como siguiente meta, realizar algunas actividades de aplicación; precisamente las actividades A.33 y A.34 cumplen con ese requisito.





**A.35** Un disco no conductor de radio  $R$  y espesor despreciable, tiene una densidad de carga uniforme  $\sigma$ . El disco se hace girar alrededor de un eje perpendicular a su plano y que pasa por su centro geométrico con una velocidad angular constante  $\omega$ . ¿Crearé un campo magnético? Justifícalo. En caso afirmativo determinar el  $\mathbf{B}$  que origina el disco en un punto cualquiera de su eje, situado a una distancia  $a$  de su centro.

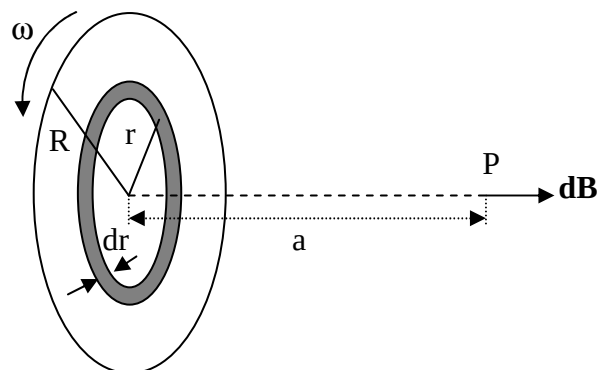
*Sugerencia: divide el disco en anillos de espesor ‘diferencial’ concéntricos entre sí y cuyo centro sea el del anillo. Esto se hace así, para poder considerar cada anillo diferencial como una espira de corriente circular de la que ya conocemos su comportamiento magnético.*

#### Comentario:

Esta es una actividad de aplicación lo mismo que las anteriores pero con una dificultad matemática muy superior. Es esperable, que la mayoría de los estudiantes por sí solos no lleguen al resultado final, por ello el concurso del profesor se antoja imprescindible (para el desarrollo matemático de la solución). En cualquier caso el profesor, con los estudiantes, hará una valoración de las variables de las que podría depender ese campo así como una primera aproximación en la forma en que el campo dependería de ellas. Por supuesto, otra tarea que pueden realizar los estudiantes es analizar el resultado y compararlo con las hipótesis emitidas.



La resolución pormenorizada de esta actividad se presenta a continuación:



Si dividimos el anillo en anillos ‘diferenciales’, cada uno de ellos al girar se comporta como una espira de corriente.

- Carga elemental de la espira:

$$dq = \sigma dS = \sigma 2\pi r dr$$



-Al girar con  $\omega$  constante se comporta como una espira de corriente con intensidad:

$$dI = (dq)/T; \text{ como } T = 2\pi/\omega \Rightarrow dI = \omega(dq)/2\pi \Rightarrow dI = \omega\sigma r dr$$

Por otro lado, el campo creado por una espira en su eje, a una distancia **a** de su centro es:

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{r^2 dI}{(r^2 + a^2)^{3/2}} \Rightarrow dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{\omega \sigma r^3 dr}{(r^2 + a^2)^{3/2}}$$

El campo magnético de todo el anillo será:

$$B = 1/2 \mu_0 \omega \sigma \int_0^R \frac{r^3 dr}{(r^2 + a^2)^{3/2}} \text{ y resolviendo la integral}$$

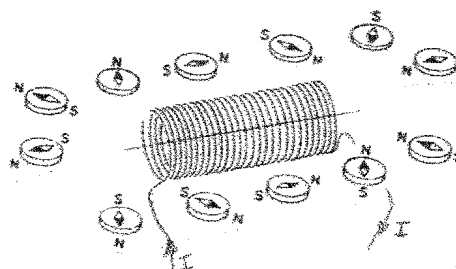
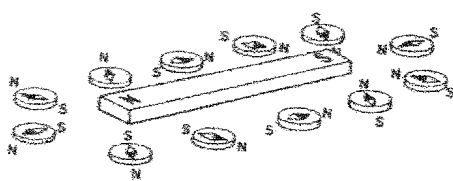
(hacer el cambio:  $r^2 + a^2 = t^2$ ), entonces el campo valdrá:

$$B = 1/2 \mu_0 \omega \sigma \left[ \frac{R^2 + 2a^2}{\sqrt{R^2 + a^2}} - 2a \right]$$

Ahora, sería interesante analizar el resultado obtenido.



**A.36** Observa la figura. ¿Podrías sacar alguna conclusión?



#### Comentario:

Esta actividad es eminentemente cualitativa (por eso hemos introducido un solenoide aunque todavía no hayamos analizado cuantitativamente el campo magnético que genera, bien es verdad que es perfectamente plausible pensar que será la conjunción de los campos que crean cada una de las espiras circulares que lo conforman) y con ella hemos querido completar otras actividades, como la A.8, A.9 y A.31, con el objetivo de abordar, de una forma racional y natural, el comportamiento de los imanes. En definitiva, en analizar por qué éstos funcionan como lo hacen.



**A.37** Resume en la siguiente tabla los campos magnéticos que hemos analizado.

| AGENTE CREADOR        | MÓDULO DEL CAMPO MAGNÉTICO | LÍNEAS DE CAMPO (DIBUJO) |
|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| IMÁN                  |                            |                          |
| CARGA PUNTUAL MÓVIL   |                            |                          |
| ELEMENTO DE CORRIENTE |                            |                          |
| HILO RECTO            |                            |                          |
| ESPIRA                |                            |                          |



**A.38** Características, atendiendo a sus posibles usos tecnológicos, de los dos tipos de fuentes de magnetismo que hemos estado analizando hasta ahora, a saber: imanes y corrientes.

#### Comentario:

Es importante que desde un punto de vista más ‘utilitarista’ no sólo se conozcan las diferentes fuentes de los campos magnéticos, sino también sus características diferenciadoras para que se sepa utilizarlas convenientemente, según para qué usos se vayan a destinar. Así pues, se trataría de cotejar diferentes aspectos como por ejemplo: a) si se requiere energía para su uso, b) si es sencilla o no su manufacturación, c) si el flujo magnético y la polaridad son controlables, d) cuáles son mejores según el uso que vayan a tener, e) a igualdad de campo quién requiere mayor tamaño, ese es pues el objetivo de esta actividad. (La tabla siguiente podría ilustrar una posible respuesta).



| <b>IMANES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>CORRIENTES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere ‘energía’.</li> <li>• Sencillo de manufacturar.</li> <li>• La intensidad de <b>B</b> depende del tamaño y del tipo de aleación.</li> <li>• Flujo magnético y polaridad constantes.</li> <li>• Ideales para sencillos y pequeños usos.</li> <li>• Para conseguir el mismo <b>B</b> que el de un electroimán se necesita un imán mucho más grande que el tamaño de aquél.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere energía eléctrica.</li> <li>• Más complicado de manufacturar.</li> <li>• La intensidad de <b>B</b> depende de la intensidad, <b>I</b>, y de las vueltas del solenoide.</li> <li>• Flujo magnético y polaridad controlables.</li> <li>• Mejores cuando se necesita un gran campo magnético.</li> <li>• No gran tamaño para generar grandes <b>B</b>.</li> </ul> |

## 5. ¿Cómo explicamos la unicidad de las fuentes del campo magnético estacionario? Modelos magnéticos de la materia.

En la primera parte del tema estuvimos analizando el comportamiento de los imanes, en cuanto a la creación de campos magnéticos, pero sin reflexionar en profundidad acerca del porqué de dicho comportamiento. Por otro lado, a lo largo del desarrollo del tema, se han ido viendo una serie de comportamientos análogos en diferentes elementos que creaban campos magnéticos lo cual nos hace ‘sospechar’ acerca de la unicidad, en el fondo, de la fuente de los campos magnéticos. Dar respuesta a esta incógnita es, precisamente, lo que abordaremos en las siguientes actividades.



**A.39** Si el magnetismo no es más que un simple efecto de la corriente eléctrica, y sin corriente no puede existir magnetismo, ¿cómo es que a un imán no hay que ‘enchufarlo’ a la corriente para que funcione?

### Comentario:

En las actividades A.5-A.8, se estuvieron manejando imanes pero no se analizó el porqué de su funcionamiento, bien es verdad que el profesor lo planteó a los estudiantes para averiguar sus ideas al respecto. Una vez visto el primer gran bloque de la unidad didáctica el profesor propondrá a los estudiantes, a través de esta actividad, la misma pregunta para averiguar si las ideas siguen siendo las mismas o por el contrario las actividades anteriores han proporcionado a los estudiantes algún indicio acerca de la verdadera razón por la cual los imanes funcionan como lo hacen.



**A.40** ¿Por qué crees que el científico L. M. Ampère sugirió, con acierto, que las corrientes eran la causa básica de todo el magnetismo, incluido el de la Tierra?

*Sugerencia: observa el resultado de las actividades previas A.9, A.10, A.12, A.31 y A.38.*

### Comentario:

Las actividades señaladas en la sugerencia han sido diseñadas, entre otros objetivos, para que los propios estudiantes, de una forma sencilla, sepan responder a la cuestión que aquí se les plantea.

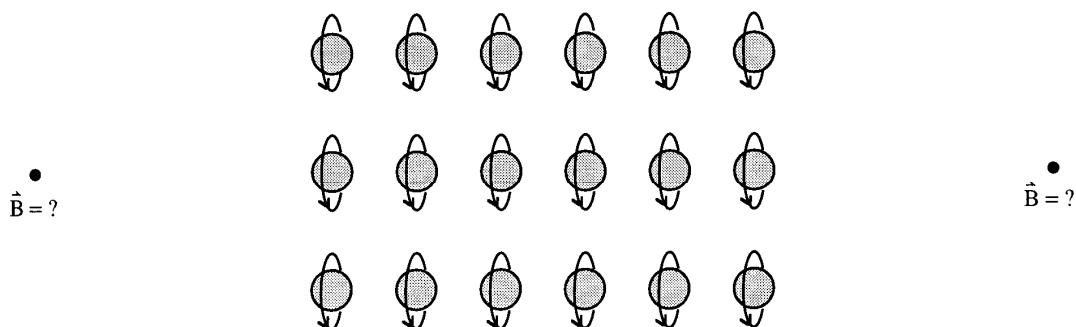


Pero la actividad es más de fondo, en el sentido que se intenta hacer ver a los estudiantes que las ideas que tienen los científicos no son meras “ideas felices”, sino que tienen una base racional.





**A.41** Si la figura siguiente representa un posible modelo de estructura atómica de los imanes, ¿cómo dibujarías en cada punto de los señalados el campo magnético creado por los átomos? Por otro lado, si  $a$  es el radio de la órbita de cada electrón alrededor de su núcleo, ¿cómo se podría calcular el valor de  $\mathbf{B}$ ?



### Comentario:

Una vez que con las últimas actividades se ha madurado y la idea de que es plausible que los imanes y las corrientes eléctricas forman parte de un esquema común, el profesor orienta las aportaciones y de forma cualitativa se aborda el modelo de Ampère de comportamiento de los imanes, según el cual en los átomos de los imanes habría un núcleo alrededor del cual giraría un electrón que daría lugar a un campo magnético ‘diferencial’ que se sumaría a los campos que crearían los electrones de los otros átomos generando, a nivel macroscópico, un campo magnético apreciable.

El objetivo principal de esta actividad es introducir el modelo de Ampère para los imanes, que de alguna manera unifica las fuentes del magnetismo, separadas durante mucho tiempo, tanto en la Historia de la Ciencia, como en la mente de muchos alumnos.



Otros objetivos complementarios serían la aplicación del principio de superposición, así como que razonen por qué se puede aplicar el campo que crea una espira cuando nos situamos lejos de ella, para de esa manera entender el campo magnético que se crea (según el modelo de Ampère) en puntos situados fuera del imán; para ello habrá que decir a los estudiantes que retomen el resultado de la actividad A.31 en lo que se refiere a su apartado b.2.



**A.42** El campo magnético teórico que se calcula, basado en el modelo anterior, cuando nos ponemos a una distancia de 18’3 cm del imán, es de aproximadamente  $4’5 \times 10^{-5}$  T. Compara este resultado con el que medimos en la actividad A.8 y saca conclusiones.

### Comentario:

Toda teoría científica debe venir avalada por los hechos experimentales. Esta actividad trata de mostrar a los alumnos y alumnas que una teoría científica no se sostiene si no da cuenta de la realidad y, además, predice acontecimientos que aún no se han producido. También conviene advertir, que porque un hecho quede certificado por dicha teoría eso no significa necesariamente que sea cierta sino que tiene un cierto grado de plausibilidad.



En esta actividad, conectamos con la actividad A.8 (allí nos limitábamos a cuantificar el valor del campo creado por un imán sin preocuparnos del porqué) para mostrar, cuando se ha adquirido un conocimiento más ‘maduro’, las causas del comportamiento de los imanes, a través de la teoría de Ampère.



**A.43** El modelo de Ampère que hemos construido, sabemos que se basa en una simplificación de la realidad puesto que en él hemos supuesto que alrededor de cada núcleo del material estaba orbitando un solo electrón, y sabemos, hoy en día, que eso no es así. ¿Cómo se modificaría el modelo explicativo para que respondiese mejor a la realidad?



**A.44** De acuerdo con el modelo magnético de la materia, analizado en la actividad anterior, ¿por qué unos materiales son imanes naturales y otros no?



**A.45** Se ha observado que un imán natural después de permanecer durante algunos instantes dentro de un horno de fundición deviene en un material que ya no es imán natural, ¿cuál podría ser la causa? (Modelo de Weiss)



**A.46** Clasificación de los materiales ferromagnéticos.  
¿Sería indiferente la elección del tipo de material ferromagnético para su utilización en actividades de carácter tecnológico? Poner algún ejemplo.

### Comentario:

Una vez mostrado y analizado el modelo de Ampère, el profesor, aprovechando que los estudiantes conocen el modelo de Böhr y han cursado varios cursos de Química, propondrá (si es que antes no la hace algún estudiante) que se valore dicho modelo a la luz de los conocimientos que hoy en día se tienen. Una vez se haya producido ese pequeño debate será el profesor el que oriente las aportaciones y las reformule, abordando las soluciones de las cuatro últimas actividades planteadas, donde de una forma cualitativa se expondrán los fundamentos de la magnetización de la materia.

Así, se comentará que el modelo simplificado de Ampère tenía ciertos déficits. En lo que se refiere al movimiento orbital el electrón no orbita en trayectorias circulares definidas, más bien sólo existe una probabilidad de



encontrar el electrón en un cierto lugar; por otro lado en muchos materiales hay más de un electrón en cada átomo que contribuye a generar el campo magnético. Además el movimiento orbital no es la única contribución, también está el movimiento de spin (cada electrón funcionaría como una bola giratoria alrededor de su eje); los dos mecanismos, en consecuencia, explicarían el comportamiento de toda la materia..., realmente no existen materiales no magnéticos. En cualquier caso, como hemos dicho, el modelo de ‘bola giratoria’ no es real como indica la Física moderna, pero las cosas funcionan como si así fuera..., por lo tanto este modelo nos vale para el nivel de enseñanza al que va dirigido.

Como consecuencia de lo anterior (todos los materiales son magnéticos); se comentará el porqué del comportamiento de los materiales, en función de su diferente estructura atómica, además de observar el distinto comportamiento de aquéllos cuando son sometidos a un campo magnético externo, dando lugar a una clasificación de materiales en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos, poniendo ejemplos de cada uno de ellos. En el caso de los ferromagnéticos, el profesor introducirá el modelo de Weiss para su explicación y hará una clasificación en ‘blandos’ y ‘duros’ según sea su comportamiento, que difiere en función de la intensidad del campo que se le aplica y su estructura interna.

Así pues, las actividades comentadas marcarían el hilo conductor para que el profesor introdujera una serie de conceptos novedosos para los estudiantes, que se enmarcarían en el ámbito de la ‘magnetización de la materia’. Los diferentes objetivos serían:

- Introducir los detalles básicos de la teoría moderna del comportamiento de los materiales.
- Clasificarlos según su comportamiento cuando están sometidos a un campo magnético externo.
- Hacer especial hincapié en los materiales llamados ferromagnéticos, introduciendo el modelo de Weiss de los “dominios” o campo interno, (como alternativa al modelo de Ampère), y que trataba de responder a una situación problemática planteada por Curie, al cambiar la temperatura de un material ferromagnético.
- Poner especial énfasis en los diferentes tipos de materiales ferromagnéticos, pues el conocimiento de comportamientos diferentes ante la acción de un campo magnético externo, es fundamental para el uso tecnológico que se les quiera dar.



**A.47** ¿Para qué crees que W. Sturgeon, en 1825, introdujo una barra de hierro dentro de un solenoide?

**Comentario:**

Hechas las actividades anteriores se trataría de ver si los estudiantes ven aplicaciones que pudieran ser interesantes. Además, como para las aplicaciones C/T/S, este aparato, el electroimán, es trascendental, resulta importante reflexionar acerca de él.



**A.48** Marca con cruces las opciones con las que estés de acuerdo. (Razónalo)

**a) Una canica de madera con carga  $Q$  positiva**

- ☐ genera un campo eléctrico
- ☐ genera un campo magnético
- ☐ genera un campo eléctrico y un campo magnético
- ☐ no genera ni campo eléctrico ni magnético

**b) Una canica de cobre con carga  $Q$  positiva**

- ☐ genera un campo eléctrico
- ☐ genera un campo magnético
- ☐ genera un campo eléctrico y un campo magnético
- ☐ no genera ni campo eléctrico ni magnético

**c) Una canica de hierro sin carga eléctrica neta**

- ☐ genera un campo eléctrico
- ☐ genera un campo magnético
- ☐ genera un campo eléctrico y un campo magnético
- ☐ no genera ni campo eléctrico ni magnético

**Comentario:**

Llegados a este punto, se trata de poner a los estudiantes ante diferentes situaciones aplicadas para evaluar hasta qué punto han conseguido un conocimiento significativo de la fuente del campo magnético estacionario.

Como se observa en la actividad se manejan diferentes tipos de materiales (aislantes, conductores, ferromagnéticos), además de no decir nada acerca del movimiento o no de la canica, con lo que serían en este último caso los propios estudiantes los que tendrían que hacer una discusión para valorar todas las posibilidades.



Se espera que algunos estudiantes contesten de una forma acrítica fijándose sólo en la naturaleza del material de la canica.

También es posible que, en la última cuestión, no se tenga en cuenta si el material ferromagnético ha sido o no (supongamos que hace poco tiempo) afectado por un campo magnético externo.

**6. Problemas prácticos que puede resolver el concepto de campo magnético (aplicaciones C/T/S)**

Una vez analizados los conceptos más importantes del tema de fuentes del campo magnético estacionario, vamos a continuación a prestar especial atención a las interacciones C/T/S, por ser éste un aspecto esencial; esto permitiría salir al paso de las, en general, visiones descontextualizadas de la ciencia.



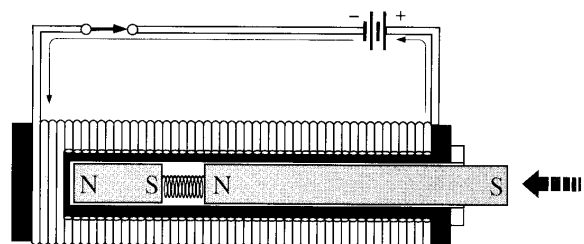
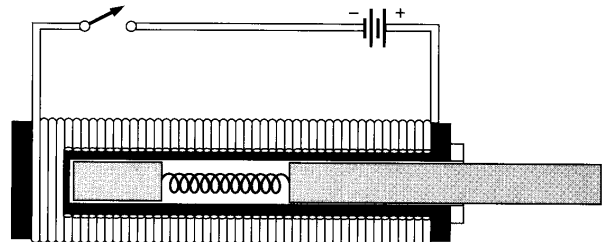
**A.49** En esta actividad se tratará de analizar diversas aplicaciones de carácter tecnológico, cuyo fundamento científico se basa en las actividades previas. Algunas, de las muchas aplicaciones que se podrían plantear, pudieran ser:

- Ver cómo funciona un electroimán y un relé
- Base del funcionamiento del motor de arranque de un automóvil.

#### Comentario:

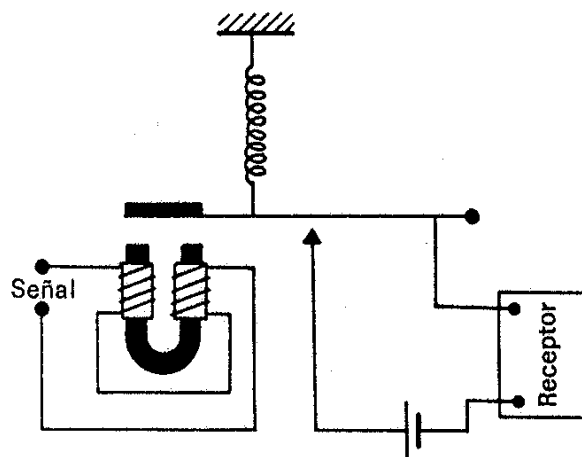
A) Con respecto al electroimán hay que decir que es un aparato presente en innumerables máquinas, por lo que tiene cierto interés mostrar su funcionamiento. En la figura siguiente, vemos dicho electroimán en dos posiciones diferentes.

En la posición inicial el interruptor está abierto por lo que no hay paso de corriente por el solenoide y el hierro dulce no se magnetiza. Cuando se cierra el interruptor, circula una intensidad de corriente que magnetiza a las dos barras de la misma manera y se comportan como dos imanes enfrentados por polos del mismo nombre, por lo que se atraen y la barra de la derecha deja de estar en contacto con otras partes del circuito no mostradas en la figura.



El muelle entre las barras sirve para que las barras no queden de forma continuada unidas entre sí. Es decir el electroimán conecta o desconecta un circuito, o una parte de éste en función de la decisión del controlador

Otro elemento muy utilizado en la tecnología eléctrica, es el de un relé cuyo esquema se muestra en la siguiente figura:



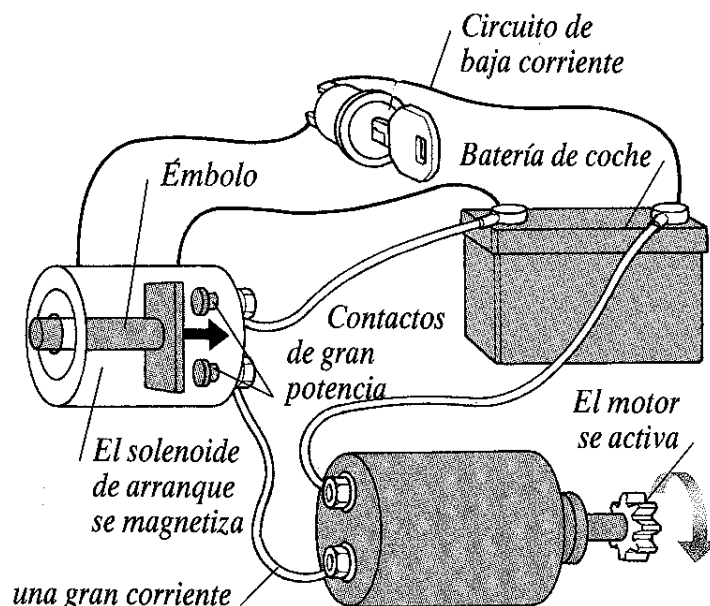
El funcionamiento básico es como sigue: cuando llega una señal eléctrica se magnetiza la barra en forma de U y atrae a la placa que está encima, entonces el circuito de la derecha se cierra y el receptor es recorrido por la intensidad de corriente del circuito de la derecha; cuando la señal de entrada desaparece, se produce el proceso contrario y por el receptor no pasa intensidad de corriente alguna.

B) Otra aplicación de interés de los electroimanes es la correspondiente a la primera etapa del *motor de arranque* de un automóvil (ver figura).

En un coche, el interruptor de arranque accionado por la llave cierra el circuito y magnetiza el solenoide, atrayendo al émbolo que así cierra el circuito de arranque.



Esta operación es necesaria ya que el motor de arranque maneja una corriente muy elevada (100 A. – 200 A.) proveniente de la batería que podría causar electrocución al conductor.



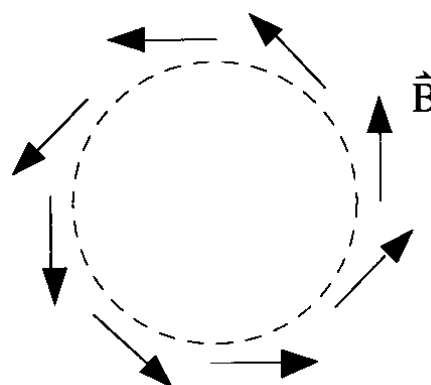
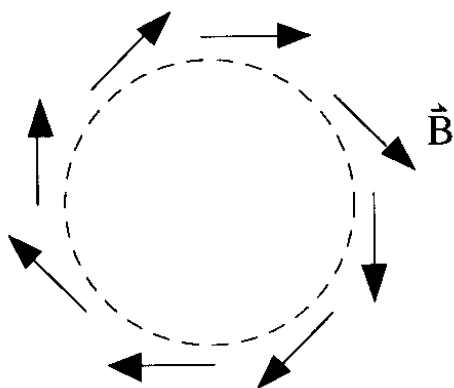
## 7. ¿Existe alguna relación cuantitativa entre las líneas de campo magnético y las fuentes del mismo?

Volviendo la vista atrás, se vio que el Teorema de Gauss, aplicado al campo eléctrico, relacionaba dicho campo con sus fuentes y, además, en determinadas ocasiones (de alta simetría), nos permitía calcular campos eléctricos de una manera, que matemáticamente era no muy compleja. Sin embargo, recordar actividad A.13, esto no sucede de igual manera en el campo magnético.

El objetivo que a continuación nos vamos a plantear, es estudiar si en el campo magnético hay una ley que nos permita hacer un análisis cuantitativo de las líneas de campo de  $\vec{B}$  y que tenga unas características duales a las que tiene el Teorema de Gauss en el campo eléctrico.



**A.50** ¿Puedes decir si la corriente eléctrica creada por un hilo conductor recto, cruza las siguientes dos superficies que se apoyan en las líneas de trazo discontinuo de la figura?



**A.51** ¿Podríamos establecer una relación cuantitativa entre el ‘patrón’ del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada y la cantidad de corriente (fuente de dicho campo), que atraviesa la región limitada por la citada trayectoria? Ley de Ampère.

#### Comentario:

En estas dos cuestiones se plantean unos interrogantes que nos permiten abordar la ley de Ampère de forma paulatina y para el caso más sencillo de los posibles. En la actividad A.50, los estudiantes deberán concluir que en los dos supuestos que se plantean, habría un hilo de corriente atravesando esas superficies; eso sí en cada una de ellas, aunque la dirección sea la misma los sentidos tendrían que ser contrarios.



En cuanto a la A.51, los estudiantes tienen que encontrar plausible que exista alguna conexión entre el ‘patrón’ del campo magnético a lo largo de la trayectoria cerrada que aparece en la actividad A.50 y la cantidad de corriente que la atraviesa. Ante esta situación el profesor debe plantear la cuestión de como modelizar cuantitativamente esa conexión. Será también el propio profesor quien oriente, como hipótesis de trabajo, que dado el carácter ‘giratorio’ del campo alrededor del hilo, sería probablemente útil integrar  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$  (denominada “circulación” del campo magnético) a lo largo de la trayectoria circular alrededor del hilo de corriente.



Con esta ley lo que perseguimos es analizar cuantitativamente las líneas del campo magnético, encontrando una relación entre el campo magnético y su fuente, realizando un proceso inverso al que hemos desarrollado en las actividades

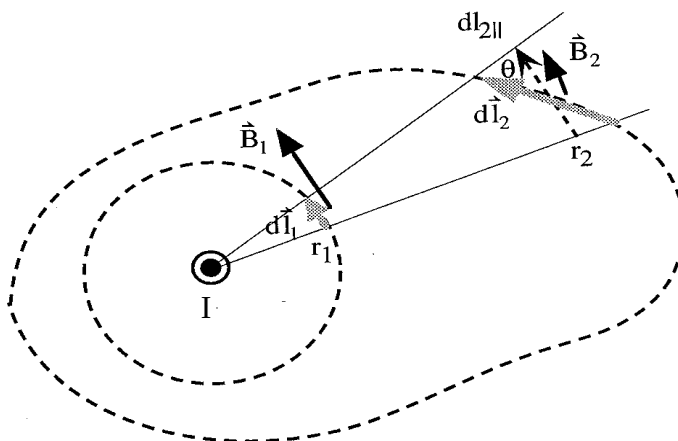
precedentes; es decir plantearse si a la vista de un patrón de campo magnético, pudiera ser posible inferir qué corrientes son responsables de dicho patrón.



**A.52** ¿Cómo cambiaría la ‘circulación de  $\mathbf{B}$ ’ si se duplicara el radio de la circunferencia que hemos elegido? Dibuja los vectores de  $\mathbf{B}$ .



**A.53** ¿Qué sucedería si no fuese circular el camino que se ha elegido?



#### Comentario:

Con esta actividad comienza un conjunto de ellas, en el que la meta es la de generalizar el resultado de la ley de Ampère obtenido en la actividad A.51. Concretamente en ésta se demostrará, por parte del profesor, que el valor numérico de la circulación del campo magnético, creado por ese hilo de corriente, es el mismo se tome la trayectoria amperiana circular o la otra que aparece en la figura que tiene una forma aleatoria, haciendo al final especial hincapié en que el valor de la circulación es idéntico independientemente de la forma de la trayectoria amperiana elegida. A continuación se muestra una posible solución a esta actividad.



La proyección de  $d\mathbf{l}_2$  sobre  $\mathbf{B}_2$  la denotaremos  $dl_{2||}$  y vale:  $dl_{2||} = dl_2 \cos\theta$

Por semejanza de triángulos podemos poner:

$$(dl_{2||})/r_2 = dl_1/r_1 \quad (1)$$

Por otro lado:

$$\mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 = B_2 dl_2 \cos\theta = B_2 dl_{2||} \quad (2)$$

Llevando (1) a (2):

$$\mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 = B_2 dl_{2||} = B_2 (r_2/r_1) dl_1 \quad (3)$$

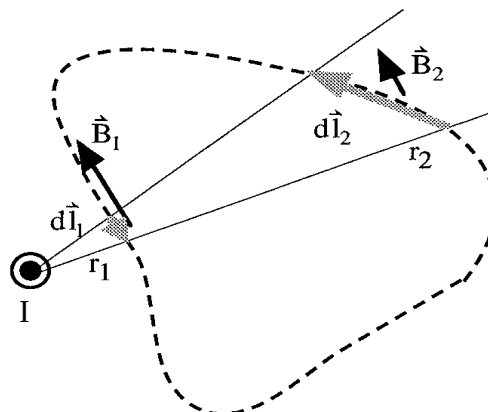
$$\text{Como } B_1 = \mu_0 I / 2\pi r_1 \text{ y } B_2 = \mu_0 I / 2\pi r_2 \Rightarrow B_2/B_1 = r_1/r_2 \quad (4)$$

Finalmente, llevando (4) a (3):  $\mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 = B_1 dl_1 = \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{l}_1$





**A.54** ¿Qué sucedería si la corriente estuviese fuera del camino?



**Comentario:**

Realizada la demostración de la actividad anterior, fundamentalmente por parte del profesor, en ésta los estudiantes, supuestamente, deberían llegar a la conclusión de que la circulación del campo magnético con respecto a esa línea amperiana valdría cero.



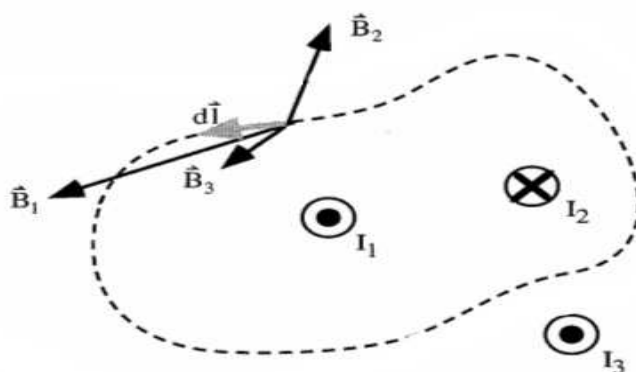
Esto se ve sencillamente...

Una vez analizado el caso anterior, y tomando ángulos muy pequeños para que el arco se asemeje al de una circunferencia, podríamos expresar:

$$\mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{l}_1 = -\mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{l}_2 \Rightarrow \text{cada dos tramos se cancelan} \Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$



**A.55** ¿Cómo aplicarías la ley de Ampère en este caso? (ver figura).  
Ley de Ampère generalizada.



**Comentario:**

Se trataría de comprobar con esta actividad el grado de aprendizaje significativo de la ley de Ampère por parte de los estudiantes, así como de enunciar dicha ley en su aspecto más general (obsérvese en la figura que existen varias intensidades de corriente con diferentes sentidos, unas dentro de la trayectoria amperiana y otra fuera). Además pondremos especial énfasis en

remarcar que el campo magnético que aparece en la expresión de la circulación de dicho campo es el total, es decir el que crean las corrientes internas y externas a la línea amperiana elegida; **no** así el  $\sum I$  que aparece en la ley de Ampère, que evalúa sólo las intensidades encerradas por la línea amperiana. (Las de fuera no crean circulación como se ha demostrado en la actividad A.54). Es decir, así como para evaluar la circulación del campo sólo hay que tener en cuenta las corrientes encerradas por la trayectoria amperiana, el campo magnético en cualquier punto de la línea amperiana dependería de las corrientes mencionadas y además de las corrientes exteriores a aquélla.

Es muy importante dedicar a esta actividad una especial atención, pues como se ha demostrado en las respuestas de los estudiantes, a cuestiones relacionadas con la ley de Ampère, aquéllos carecen de un conocimiento significativo de dicha ley, confundiendo en muchas ocasiones la circulación del campo con el propio campo. Veamos, de forma detallada, una posible demostración:

Es evidente que en la línea amperiana de puntos no se dan las condiciones para poder utilizar la ley de Ampère para calcular el campo total, (ni siquiera el parcial), pero podemos poner:

$$\oint \vec{B}_1 \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_1 \text{ (aunque } B_1 \text{ no se podría calcular por la ley de Ampère) (1)}$$

$$\oint \vec{B}_2 \cdot d\vec{l} = -\mu_0 I_2 \text{ (con la misma salvedad que antes) (2)}$$

$$\oint \vec{B}_3 \cdot d\vec{l} = 0 \text{ pues está fuera de la línea amperiana (3)}$$

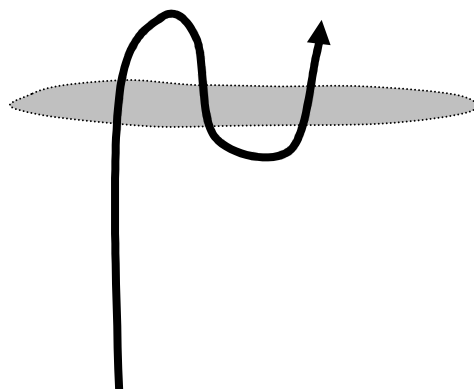
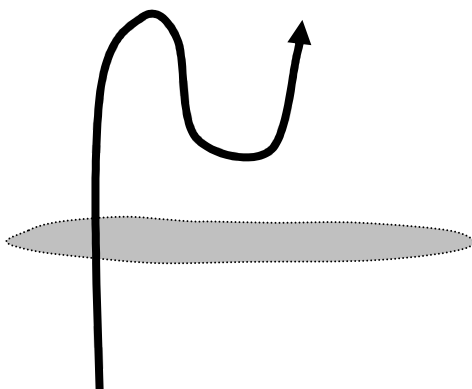


$$\text{Si hacemos (1)+(2)+(3)} \Rightarrow \oint \vec{B}_T \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$

Donde el  $B_T$  es el campo total debido a los tres hilos, mientras que la suma de las corrientes,  $(I_1 - I_2)$ , sólo es de las encerradas por la línea amperiana (cada una con su signo adecuado en función del sentido que hemos considerado como positivo y que aparece en la figura).



**A.56** ¿Qué corrientes atraviesan el camino? (ver figura).



### Comentario:

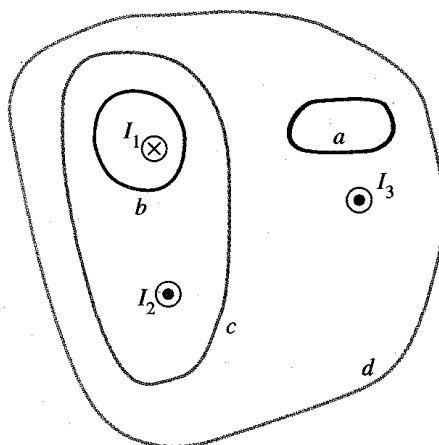
Pudiera darse el caso que las intensidades de corriente estacionarias que manejamos no fuesen rectilíneas sino con una forma cualquiera, como la que aparece en la figura; esto a veces plantea dificultades a los estudiantes. El objetivo de esta actividad es ver cómo se podría actuar, para aplicar la ley de Ampère, cuando las corrientes tuvieran formas extrañas y de forma subyacente para “afinar” más en el enunciado de dicha ley, (importante, por ejemplo, para entender la ley de Ampère-Maxwell en una posterior lección de magnetismo).



En las dos figuras se observa que se tome la superficie que se tome, apoyándose eso sí en la línea amperiana, el  $\sum I$  que aparece en la ley de Ampère es idéntico.



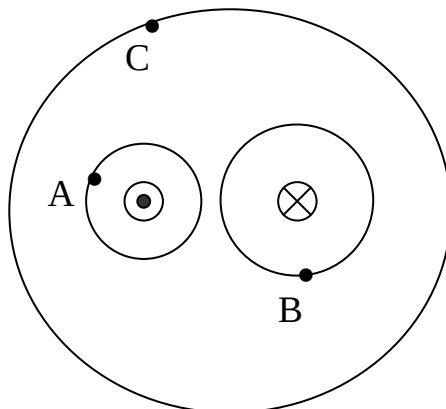
**A.57** En la figura se muestran, en sección transversal, varios conductores por los que circulan corrientes a través del plano de la figura. Las corrientes tienen magnitudes:  $I_1=3A$ ,  $I_2= 3A$ ,  $I_3=5A$  y las direcciones que se indican. Por otro lado se muestran cuatro trayectorias marcadas con a, b, c y d. ¿Cuál es la integral de línea, (circulación del campo magnético),  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$  para cada una de ellas?



**A.58** Los hilos de corriente ‘infinitos’ que se muestran en el dibujo son de 10 A y son perpendiculares con respecto al plano del papel, siendo uno dirigido hacia adentro y el otro hacia afuera. Las trayectorias curvas son circulares.

- ¿Cómo calcularías, utilizando la ley de Ampère, el campo magnético que crea la corriente saliente en el punto A?
- ¿Cómo calcularías el campo magnético en el punto B?

c) Un estudiante, una vez que ha aplicado la ley de Ampère, afirma lo siguiente: “El campo magnético en el punto C, debido a las dos corrientes es nulo”. Razona y saca conclusiones.



### Comentario:

- Con esta actividad se pretenden conseguir varios objetivos, a saber:
- Ver el grado de aplicabilidad de la ley de Ampère, para calcular campos magnéticos.
  - Sacar a la luz la excesiva operativización que hacen los estudiantes de dicha ley, obviando un tema de la trascendencia de la simetría.
  - Sacar a la luz la no aplicación del principio de superposición, consecuencia de la utilización acrítica de dicha ley, entendiendo, por ejemplo, que el campo magnético en un punto del espacio sólo lo produce la intensidad que atraviesa la línea amperiana, en definitiva soslayando un aspecto básico de la ley de Ampère, como es el hecho de que el campo que aparece en su expresión matemática es el total, es decir el de las fuentes internas y externas a la trayectoria amperiana.
  - Poner de manifiesto la no realización de análisis de resultados, para comparar resultados obtenidos mediante otras estrategias de resolución; por ejemplo con los resultados del apartado c) de las actividades previas: A.25 y A.27.
  - En definitiva que sepan distinguir claramente entre el cálculo de la circulación del campo magnético y el del propio campo.



Veamos una resolución más detallada:

a) En el punto A, dibujaríamos una línea amperiana circular concéntrica con el hilo saliente y podríamos poner:

$\oint (\vec{B}_1 + \vec{B}_2) \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_1 = \mu_0 10 = \oint \vec{B}_1 \cdot d\vec{l} + \oint \vec{B}_2 \cdot d\vec{l}$  donde el valor de esta última integral es cero por estar el hilo fuera de la superficie amperiana elegida, luego quedaría:  $\oint \vec{B}_1 \cdot d\vec{l} = 10\mu_0$ . Como en este caso  $\vec{B}_1$  es constante en todos los puntos de la línea amperiana y paralelo a  $d\vec{l}$  se puede sacar fuera de la integral y quedaría:  $B_1 2\pi r = \mu_0 10$

b) En el punto B, el campo, como siempre, es el total. Se podría calcular el campo creado por el hilo encerrado en la línea de la derecha, bien por Ampère o por Biot y Savart y sumarle el campo creado por el hilo de la izquierda; en este último caso por Ampère utilizando una línea amperiana (no dibujada), que sería una circunferencia centrada en el hilo de la izquierda y que pasara por el punto B. En todo caso hay que decir que con la línea de la derecha no se podría calcular el campo total (utilizando Ampère) en B, que es lo que se pide, pues dicho campo no es constante en todos los puntos de la circunferencia de la derecha.

c) Para empezar hay que decir que los estudiantes que aplican Ampère, para calcular el campo en C, no lo podrían hacer, pues dicho campo no es constante en todos los puntos de la línea amperiana elegida.

El déficit que suelen tener los estudiantes es que identifican circulación con campo y, en consecuencia, si la circulación es cero (eso en este caso sería cierto) aseguran, más tarde, que el campo es cero, lo que puede ser falso (como en este caso).



**A.59** Calcular el campo magnético que crea un solenoide en su eje:

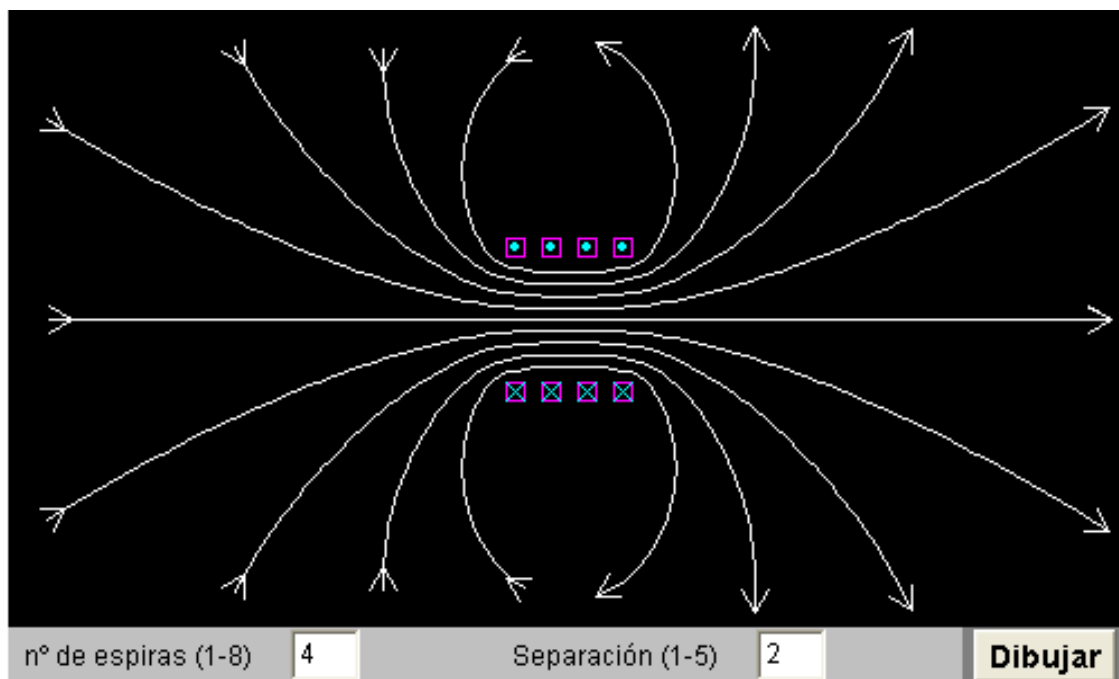
a) Utilizando la ley de Biot y Savart

a.1) Analiza el resultado cuando la longitud del solenoide es mucho mayor que el radio de cada espira y además nos situamos en el centro del mismo y/o en los extremos.

b) Utilizando la ley de Ampère, bajo el supuesto de que el campo magnético es uniforme en el interior del solenoide y cero en el exterior.



c) En el siguiente applet, 'Solenoides. Ley de Ampère', observa las líneas de campo que darían cuenta del campo que genera un solenoide largo. ¿Es coherente con los resultados obtenidos con anterioridad?



### Comentario:

El objetivo es reflexionar y analizar en profundidad un aparato que es la base fundamental del electroimán, del que como se recordará hemos visto diferentes aplicaciones tecnológicas. Hemos esperado hasta aquí para que se pudiera calcular el campo que crea utilizando dos estrategias: ley de Biot y Savart, por un lado, y la ley de Ampère por otro.

Utilizamos la ley de Biot y Savart, fundamentalmente por parte del profesor, porque es la única manera de, al analizar el resultado obtenido, desarrollar los casos particulares más interesantes, donde destaca el campo creado en el entorno del centro y también en los extremos (todo ello en el interior del solenoide). Se hará también una valoración de lo que ocurre fuera del solenoide.

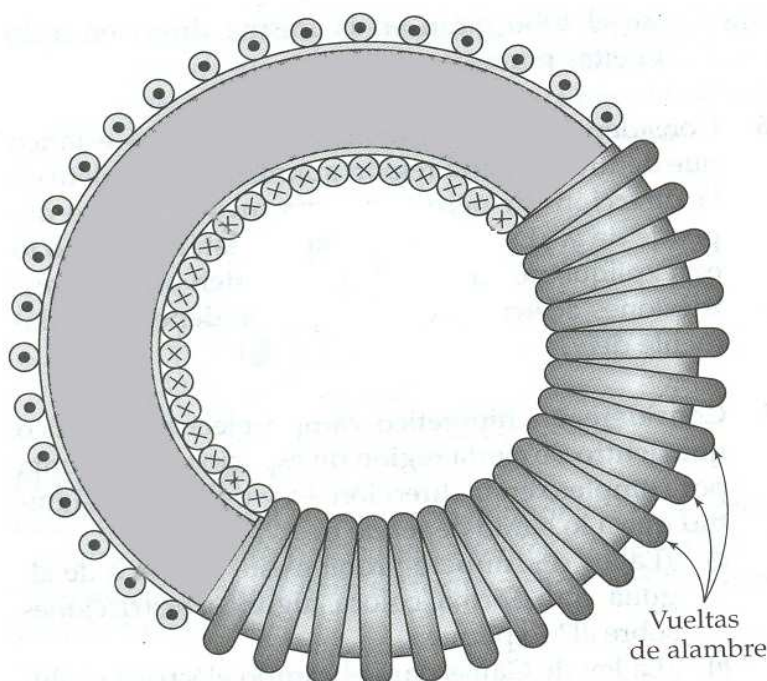


En cuanto al cálculo mediante la ley de Ampère, vistos los casos límite anteriores, se podrá partir del hecho de que el campo magnético en el interior es prácticamente constante cerca del centro y despreciable fuera. En el applet se podrá visualizar los diferentes aspectos mencionados desde una óptica analítica.



En otro orden de cosas, se hará hincapié en que el campo magnético es el creado por todas las espiras y no sólo por las encerradas en la línea amperiana.

**A.60** Calcular el campo magnético que crea, tanto en su interior como en su exterior, una bobina toroidal (solenoides doblado en forma de círculo), de  $N$  espiras, por la que circula una intensidad de corriente  $I$  ¿Por qué crees que al doblar el solenoide se le da esa forma?



**Comentario:**

En esta actividad, se espera que los estudiantes lleguen a vislumbrar que de la misma manera que un hilo se dobla en forma de circunferencia para conseguir un campo magnético mayor en su interior, pues allí se agolpan las líneas de fuerza, algo parecido, y por idéntica razón, acontecerá si es un solenoide el que se dobla para formar un toroide. Además planteamos esta actividad porque se dan las condiciones de simetría para, utilizando la ley de Ampère, poder calcular de una forma sencilla el campo que crea este dispositivo.



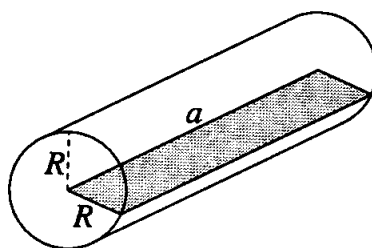
**A.61** Calcular el campo magnético, creado en cualquier punto del espacio, por un hilo conductor cilíndrico e indefinido de diámetro  $d$  que transporta una intensidad por unidad de área, constante  $J = \frac{I}{S} = \text{cte.}$  Interpretar gráficamente el resultado obtenido.

**Comentario:**

Se trata de una actividad que da cuenta de un caso que desde el punto de vista tecnológico es muy interesante. Cuando aplicáramos la ley de Ampère tendríamos en cuenta que el campo lo produce el total de las cargas móviles. Por otro lado en la valoración de las variables de las que dependería el campo, el estudiante tendría que llegar a ver que en el interior a medida que el radio crece (me alejo del centro), el campo tendría que crecer pues tendríamos “más cantidad de fuente”, mientras que cuando salgo del hilo y me alejo el campo tendría que disminuir, pues la fuente es la misma pero la distancia va aumentando. Por supuesto se valoraría en el análisis de resultados estas hipótesis, tanto analítica como gráficamente.



**A.62** Un conductor metálico cilíndrico de longitud infinita lleva una corriente  $I$  uniformemente distribuida por su sección. Calcula el flujo del campo magnético, (previa hipótesis de variables), que atraviesa la superficie plana de longitud  $a$ , situada como se muestra en la figura, y analiza el resultado obtenido.

**Comentario:**

El fin que se persigue es que en un mismo ejercicio tratemos dos de los asuntos capitales de esta lección: el flujo magnético, (que además no es constante), en combinación con la ley de Ampère.

En primer lugar, los estudiantes, tendrán que llegar a valorar que el flujo será una función que depende de diversas variables, como la siguientes:  $\Phi = f(I, a, R, \mu)$ , además de adelantar de qué forma depende de ellas. Una vez realizadas las estrategias correspondientes para resolverlo, se analizará el resultado para ver si es coherente o no con lo que habíamos supuesto. Veamos, a continuación, una posible resolución de la actividad.



- Consideremos que el sentido de la  $I$  es de derecha a izquierda. El flujo que atraviesa la superficie 'sombreada' se debe al campo magnético en el interior del conductor cilíndrico.

- Ya se ha visto con anterioridad que el campo en el interior de un cilindro de radio  $R$ , recorrido por una  $I$  repartida homogéneamente por toda su sección era:

$$B_{\text{int}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R^2} r \quad \text{donde } 0 < r \leq R$$

- El flujo que atravesará la superficie dependerá de:

$\Phi = f(I, a, R, \mu)$  Esta dependencia será de la siguiente forma:

Si  $\mu \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  pues  $B_{\text{int}} \uparrow$

Si  $I \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  pues  $B_{\text{int}} \uparrow$

Si  $a \uparrow \Rightarrow \Phi \uparrow$  pues crece el área

Si  $R \uparrow \Rightarrow$  existe una doble posibilidad, que en este caso concreto, son contrapuestas; por un lado  $\Phi \uparrow$  pues crece el área, pero por otro  $\Phi \downarrow$  ya que para una misma  $I$  la densidad de corriente,  $J$ , disminuiría y, por lo tanto, la fuente del campo disminuiría ( $B_{\text{int}} \downarrow \Rightarrow \Phi \downarrow$ ). Hasta el final no sabremos cómo depende de  $R$ , si es que lo hace.

- Para calcular el flujo, puesto que el campo no es constante en todo el área tendremos que hacer un problema equivalente al que ya se hizo en la actividad A.26. Considerando el vector  $d\vec{S}$  perpendicular a la superficie sombreada y hacia arriba, lo mismo que es el campo magnético  $\vec{B}$ , podemos poner:

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B dS = \frac{\mu_0}{2\pi} I \frac{r}{R^2} a dr \Rightarrow \text{El flujo a través de toda la superficie será:}$$

$$\Phi = \int_0^a d\Phi = \int_0^a \frac{\mu_0}{2\pi} I \frac{r}{R^2} a dr = \frac{\mu_0}{2\pi} I \frac{a}{R^2} \int_0^a r dr \Rightarrow \Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} I a$$



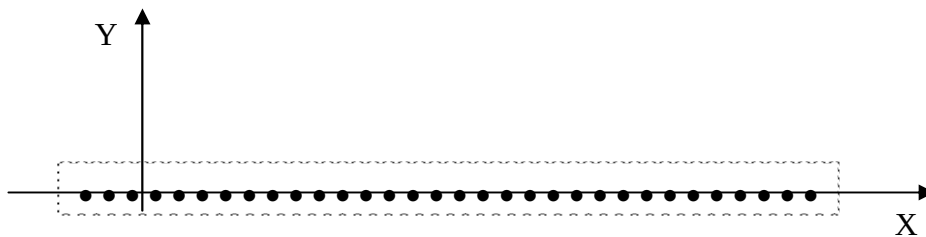
A la vista del resultado se observa la coherencia de las hipótesis emitidas y que la doble 'actuación' de  $R$  se ha cancelado entre sí.



**A.63** No siempre la corriente se transporta en conductores cilíndricos. En los chips de los semiconductores o en ciertos circuitos impresos, por



ejemplo, hay bandas conductoras planas, mucho más anchas y largas que gruesas, que llevan la corriente entre los elementos del circuito. Este modelo de lámina es como si tuviéramos un conjunto infinito de conductores paralelos, de manera que entre todos transportaran una densidad lineal de corriente  $J$  (corriente por unidad de longitud “ $x$ ”, anchura). Obtener la expresión del campo magnético creado por una lámina de corriente infinita.

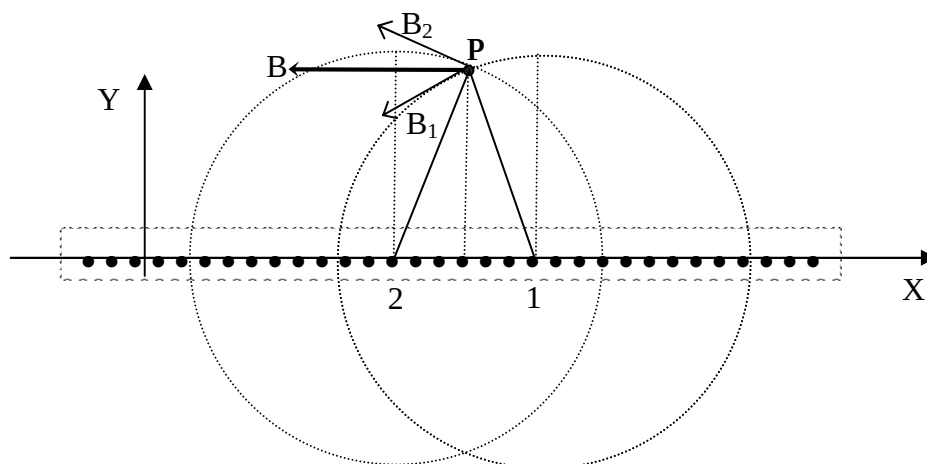


**Comentario:**

El contexto del problema presenta un cierto carácter CTS para un ingeniero. Una importante aportación de este problema, en lo que a estrategia de resolución se refiere, es que rompe con la simetría cilíndrica que en la mayoría de las ocasiones se plantea cuando se obtienen campos magnéticos por aplicación de la ley de Ampère. Este uso reiterativo de situaciones con la misma simetría puede originar en los estudiantes fijaciones funcionales, que con enunciados de este tipo pretendemos sacar a la luz y corregir. En el análisis de resultados se presta especial atención a la dependencia del campo con la distancia (la no dependencia, en este caso) y puede ser una oportunidad de conectar con el campo eléctrico creado por un plano infinito, estableciendo comparaciones entre las dos situaciones.

Veamos un conjunto de actividades de cara a resolver este problema:

¿Cómo podemos interpretar la situación descrita en el enunciado?



En este modelo de la lámina, como un conjunto infinito de conductores paralelos, puesto que cada uno produce líneas circulares de campo, la superposición de campos debidos a los distintos conductores resulta paralela a la lámina y perpendicular a la intensidad de corriente. Para ser más precisos, en cualquier punto P (por encima de la lámina) se definen pares de conductores (1 y 2, en la figura) equidistantes de P. El campo magnético originado por cada par tiene la dirección negativa de las X. El sentido del campo se invierte a ambos lados de la lámina. Podemos interpretar este hecho recordando que las líneas de campo magnético tienden a rodear a su fuente. Si la lámina es infinita (lo cual no es más que una idealización que supone que nos encontramos muy próximos a ella) las líneas no alcanzan a circunvalarla y se mantienen paralelas a ella.

¿Podemos adelantar de qué variables dependerá el campo magnético en cuestión?

Si aumentamos la densidad de corriente, aumentamos la intensidad de la fuente del campo magnético por lo que éste se hará mayor.

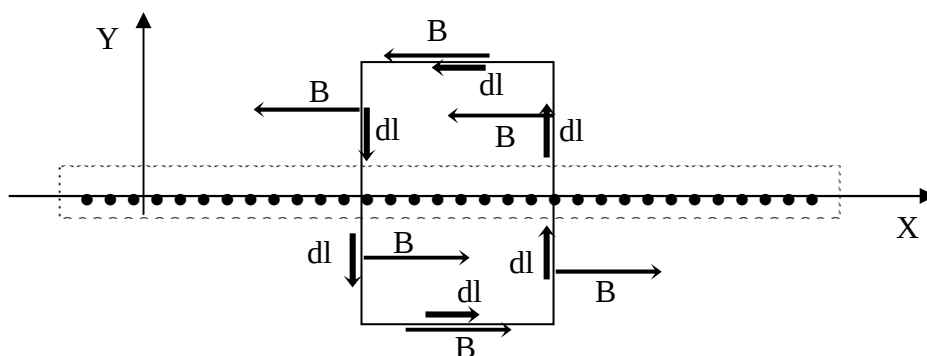


La interacción magnética disminuye con la distancia a la fuente, así, a mayor distancia a la placa cabe esperar que el campo sea menor. Sin embargo, para considerar la lámina infinita la distancia del punto P a ella debe de ser muy pequeña. En esta situación límite la dependencia del campo con la distancia no resulta fácil de predecir.

La permeabilidad del medio es un factor que altera el campo. En nuestro caso consideraremos el aire y, por tanto, constante.

En definitiva,  $B_p = B_p(J, d, \mu_0)$ .

¿Cómo podremos obtener la expresión matemática del campo magnético creado por la lámina?



Podemos elegir como curva de Ampère un rectángulo con dos lados paralelos a la lámina, a iguales distancias del plano central. Estos dos lados también son paralelos al campo magnético generado por toda la banda conductora que, por otro lado, es constante en todos los puntos de estos lados. Los otros dos

son perpendiculares a la lámina y, por tanto, perpendiculares al campo magnético por lo que el producto escalar del campo por el desplazamiento es cero. En estas condiciones,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2Bl \text{ y de acuerdo con la ley de Ampère, } 2Bl = \mu_0 J l, \text{ luego, } B = \mu_0 J / 2$$

¿Es coherente el resultado con respecto a las hipótesis emitidas?

Lo es en lo referente a la densidad de corriente (la fuente del campo), pero resulta independiente de la distancia a la lámina infinita. Este resultado, aparentemente incongruente, pues la interacción por principio disminuye con la distancia a la fuente, ya lo habíamos encontrado para el campo eléctrico en el caso del plano infinito. Debemos tener en cuenta que las dimensiones infinitas no son más que una aproximación y, por ello, el resultado independiente de la distancia obtenido también lo será. El paralelismo con el plano de carga infinito se da, así mismo, en el aspecto formal de la expresión matemática:  $E = \sigma / 2\epsilon_0$  para el caso eléctrico y  $B = \mu_0 J / 2$  para la lámina de corriente.

¿Es dimensionalmente homogéneo el resultado?

De la expresión obtenida,  $\frac{T \cdot m}{A} \frac{A}{m} \equiv T$ , y, desde el punto de vista de las unidades, es coherente.