



Las líneas de campo dan una idea cualitativa de cómo varía “la cantidad de campo magnético” que atraviesa una espira, ¿pero no hay manera de hacer esto cuantitativamente?



Sí, en el próximo apartado veremos cómo, y también cómo expresar mediante una fórmula los resultados descritos en esta sección.

4.2. Ley de la inducción electromagnética.

En el apartado anterior hemos respondido solo cualitativamente a la pregunta *¿cómo obtener corriente eléctrica a partir del magnetismo?*, ahora veremos cómo expresar los resultados obtenidos mediante una fórmula. Comenzaremos introduciendo una magnitud que caracteriza a “la cantidad de campo magnético” que atraviesa determinada superficie, para lo cual nos auxiliaremos de la representación del campo por medio de líneas.

4.2.1. Flujo de campo magnético.

Como sabes, las líneas de campo se trazan de modo que su concentración sea proporcional a la magnitud del campo. Así, si se tiene una región en que su magnitud es dos veces mayor que en otra (Fig. 4.5), entonces en la primera las líneas de campo se representan de modo que la concentración de ellas sea doble.

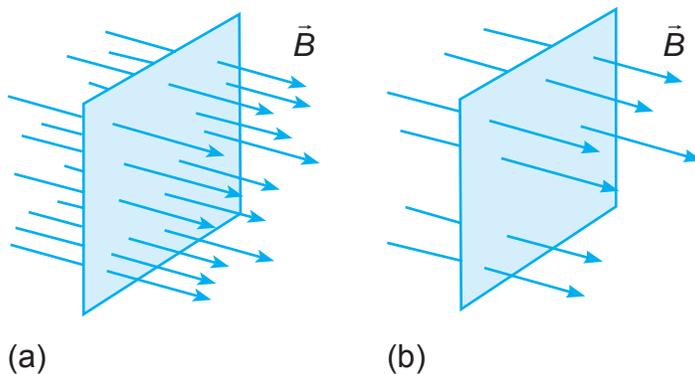
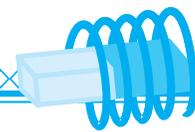


Fig. 4.5. En (a) la magnitud del campo magnético es dos veces mayor que en (b) y por eso el número de líneas de campo representadas es doble.

Consideremos una región en la que el campo magnético puede asumirse uniforme y una superficie de área A **perpendicular a las líneas de campo**, como en los casos de la Fig. 4.5. Si n es la concentración de las líneas de campo que atraviesan la superficie, es decir, su número por unidad de área, entonces la cantidad total de ellas es:

$$N = nA.$$

Esta fórmula está escrita en términos de líneas de campo, las cuales, como sabes, son solo un recurso visual. Sin embargo, sugiere cómo medir la “cantidad de campo magnético” que atraviesa la superficie.

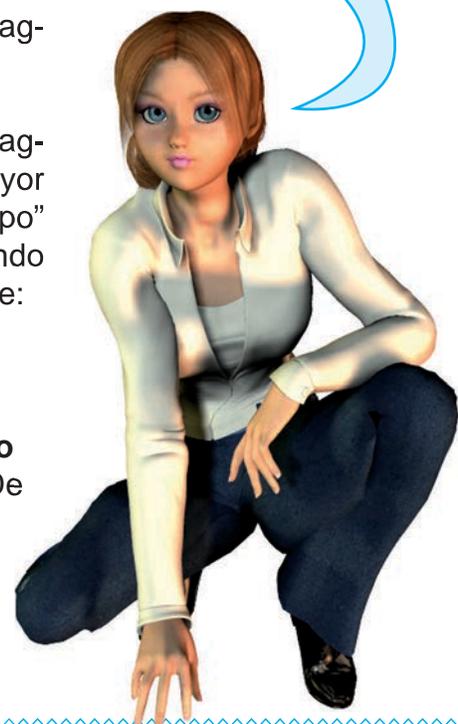
En efecto, la concentración n de líneas representa la magnitud B del campo (a mayor concentración de líneas mayor campo) y el número total de ellas N , la “cantidad de campo” que atraviesa la superficie completa. Por eso, sustituyendo N por la “cantidad de campo” y n por B , puede escribirse:

$$\text{“Cantidad de campo magnético”} = BA$$

Esta magnitud se denomina **flujo de campo magnético** y se designa por la letra Φ (letra griega fi mayúscula). De modo que:

$$\Phi = BA$$

Ah, el término “flujo” de campo seguramente tiene su origen cuando las líneas se dibujan atravesando una superficie, parece como si algo fluyera a través de ella.





(a)



(b)

Fig. 4.6. Esquema en 3 D una espira colocada en un campo magnético uniforme de modo que su superficie es: a) perpendicular a las líneas de campo, b) forma otro ángulo con las líneas de campo. En (b) el flujo de campo es menor que en (a).

Cabe señalar que esta fórmula solo es válida cuando la superficie considerada es perpendicular a las líneas de campo magnético. Si forma otro ángulo con las líneas de campo, entonces el flujo es menor que el producto BA . Esto puedes entenderlo con ayuda de la figura 4.6, la cual muestra una vista transversal de una misma lámina colocada en un campo magnético uniforme en dos casos: (a) perpendicularmente a las líneas de campo, (b) formando otro ángulo con la líneas. Obseva que el número de líneas que atraviesa la lámina en (b) es menor que en (a), por lo que el flujo de campo también es menor.

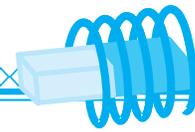
¿Lo anterior significa que si cierta superficie es paralela a las líneas de campo, entonces el flujo de campo es cero?

En efecto, en ese caso ninguna línea de campo atravesaría la superficie.



Ahora, empleando el concepto de flujo de campo magnético, puede decirse que:

Para inducir corriente eléctrica en una bobina lo esencial es variar el flujo de campo magnético que la atraviesa.



Si, lo esencial para inducir una corriente eléctrica en una espira es variar el flujo de campo magnético que la atraviesa, ¿entonces ello pudiera también lograrse haciendo girar la espira!



Efectivamente, y además variando el área de ella que es atravesada por las líneas de campo. Como ves, hay muchas formas de variar el flujo que atraviesa una espira y, por tanto, de inducir corriente eléctrica en ella. A propósito, el giro de espiras es la base de los generadores inducción, de los cuales proviene prácticamente toda la energía eléctrica que empleamos.

4.2.2. Ley de Faraday de la inducción electromagnética.

Utilizando los conceptos de **flujo de campo magnético** y **fem**, pueden expresarse los resultados obtenidos cuantitativamente. Es lo que se conoce como **ley de Faraday de la inducción electromagnética**:

La fem inducida en una espira es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo de campo magnético a través de la espira.

Y mediante una fórmula:

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Cuando el campo magnético se expresa en **tesla**, como hemos hecho nosotros, la constante de proporcionalidad entre ε y $\Delta\Phi/\Delta t$ es uno.





Observa que no es la intensidad de corriente la que interviene en la ley, sino la fem. Ello explica el efecto multiplicador de una bobina respecto al de una espira. Al variar el flujo de campo magnético que atraviesa la bobina, se induce una fem en cada una de sus espiras. Normalmente esta fem es muy pequeña, pero las espiras se comportan como un gran número de fuentes de fem conectadas en serie, lo que da por resultado una fem apreciable en los terminales de la bobina.

El signo menos que aparece en la fórmula tiene una interpretación física muy importante: la fem originada en la espira es opuesta a la variación del flujo del campo magnético. Esto significa que, por ejemplo, si movemos un imán acercándolo a una espira (Fig. 4.7), la fem inducida es tal que produce una corriente con el sentido indicado en la figura, de tal modo que el flujo de campo magnético creado por ella se opone a la variación del flujo de campo del imán. Concretamente, en el experimento de la figura 4.7, el flujo de campo del imán a través de la espira aumenta, por lo que el creado por la espira estará dirigido en sentido opuesto.

En la experiencia de la figura 4.7, ¿cuál sería el sentido de la corriente eléctrica si el polo del imán que se aproxima a la espira fuese sur en lugar de norte? ¿Y si el imán se moviera alejándose de la espira en lugar de acercándose? Argumenta tus respuestas.

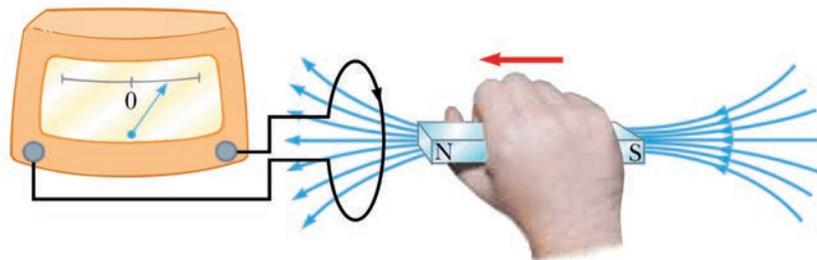
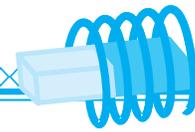


Fig. 4.7. Al acercar un imán a una espira, se induce en ella una fem que se opone al aumento del flujo de campo que la atraviesa.

Observa que cuando aparece corriente en la espira de la figura 4.7, ella se comporta como una especie de imán, con un polo en cada cara. ¿Cuál sería el polo norte y cuál el sur? ¿Qué tipo de fuerza surge entre el imán y la espira? Argumenta tus respuestas.



La **ley de conservación de la energía** permite comprender por qué el flujo de campo magnético creado por la espira tiene que ser opuesto a la variación de flujo del campo magnético externo. Por ejemplo, imaginemos que en el experimento de la figura 4.7 el sentido de la corriente fuese contrario al representado. Entonces el flujo de campo magnético creado por la espira contribuiría a reforzar el aumento del flujo del campo externo. Esto implicaría que creciesen aún más la fem y la corriente en la espira. En otras palabras, la fem y la corriente inducida en la espira aparecerían no solo debido a la acción externa, sino también por sí mismas. Se llegaría así a la conclusión de que la espira crea energía, lo que contradice la ley de conservación de esta magnitud. Por consiguiente, el sentido de la corriente tiene que ser el indicado.

La característica mencionada de la fem inducida fue establecida por Heinrich Lenz, por lo que se conoce como **ley de Lenz**:

La fem inducida en una espira tiende a producir una corriente que genera un flujo de campo magnético opuesto a la variación de flujo del campo magnético externo.



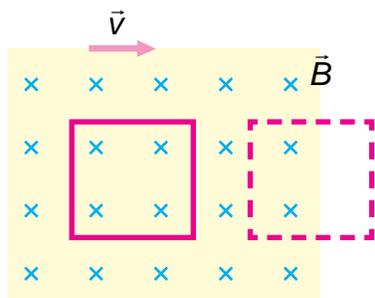
Por lo que se dice en el texto, veo que la ley de Lenz es en realidad consecuencia de una ley mucho más general, la de conservación de la energía.





Ejemplo. 4.1. Una bobina formada por 100 espiras cuadradas, de 10 cm de lado, se encuentra en un campo magnético uniforme de 1.5 T cuyas líneas de campo son perpendiculares al plano de las espiras. La bobina se desplaza a través del campo con velocidad constante y demora 0.50 s desde que comienza a salir del campo hasta que termina. a) Calcula la magnitud de la fem que se induce en la bobina mientras está saliendo del campo. b) Si la bobina tiene una resistencia de 1.6 Ω , ¿cuál es la intensidad de corriente en ella?

A continuación se ha esquematizado la situación descrita. En el esquema se ha representado la sección transversal de la bobina y por eso solo se ve una espira.



a) El flujo de campo magnético que atraviesa la bobina empieza a disminuir a partir del instante en que se inicia su salida del campo. Según la ley de inducción electromagnética, esta variación del flujo de campo origina una fem en las espiras. Puesto que el movimiento de la bobina es uniforme, la rapidez con que varía el flujo es constante y, por tanto, también la fem inducida. Claro está, la fem (como cualquier otra magnitud), no puede variar instantáneamente, pero no tendremos en cuenta el pequeñísimo intervalo de tiempo en que pasa de cero a su valor constante.

La fem inducida en cada espira es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Como el flujo de campo magnético Φ es perpendicular al plano de las espiras, puede ser hallado utilizando la fórmula $\Phi = BA$.

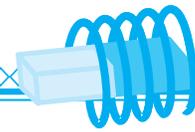
Justo antes de comenzar a salir del campo, el flujo a través de la bobina es BA y cuando termina de salir 0. Por consiguiente, su variación es:

$$\Delta\Phi = 0 - BA = -BA$$

El área de la espira es: $A = (10 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

De ahí que la fem inducida en cada espira es:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{-BA}{\Delta t} = \frac{-(1.5 \text{ T})(1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2)}{0.50 \text{ s}} = 0.030 \text{ V}$$



El signo menos simplemente significa, que la fem es tal que el flujo de campo magnético producido por la espira es opuesto a la variación del flujo del campo magnético externo.

La bobina tiene 100 espiras, por lo que se comporta como si se tratara de 100 fuentes de fem en serie. De modo que la magnitud de la fem en la bobina es 100 veces mayor que en una espira: 3.0 V.

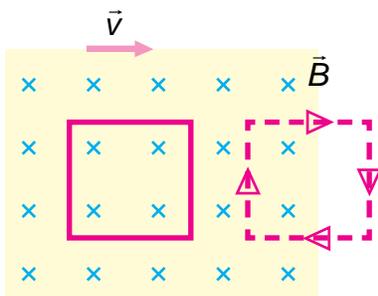
b) Según la ley de Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{3.0 \text{ V}}{1.6 \Omega} = 1.7 \text{ A}$$

Ejemplo 4.2. En la situación del ejemplo anterior, encuentra el sentido de la corriente inducida: a) mientras la bobina se mueve, pero aún sin comenzar a salir del campo, b) mientras está saliendo del campo, c) luego de cierto tiempo de haber salido de él.

a) Mientras la bobina se está moviendo en el campo magnético, pero aún sin comenzar a salir de él, el flujo de campo magnético a través de ella permanece constante, por lo que no se induce fem, ni por tanto tampoco corriente eléctrica.

b) Según la ley de Lenz, la corriente debe ser tal que el flujo de campo magnético originado por la bobina sea opuesto a la variación del flujo del campo externo que la atraviesa. De acuerdo con la regla de la mano derecha, en el esquema de la figura la corriente debe circular como se muestra, en sentido horario.



c) Luego de cierto tiempo de haber salido la bobina del campo magnético, no hay variación de flujo de campo magnético a través de ella y por tanto tampoco fem inducida ni corriente eléctrica.