



INSTITUTO de ENSEÑANZAS a DISTANCIA de ANDALUCÍA

**2º de Bachillerato**

**Física**

**Contenidos**

**Interacción electromagnética. Campo magnético:  
Inducción magnética**

# 1. Introducción

Realmente la electricidad ha cambiado nuestras vidas, y a mejor. Se puede decir que se ha domesticado para ponerla a nuestro servicio, pero ¿has pensado alguna vez cómo se "fabrica" la electricidad que llega a nuestras casas? ¿o cómo funciona la dinamo de una bicicleta?

Imagino que algo debes saber de cursos anteriores. Habrás oído o leído cómo son las centrales hidroeléctricas o térmicas, o nucleares. Pero la pregunta no es dónde se produce la electricidad, sino cómo se produce. Sin duda éste es un asunto muy interesante que, como puedes imaginar, tuvo (y tiene) unas repercusiones tecnológicas tremendas.

Pues bien, la producción de electricidad fue objeto de estudio a principios del siglo XIX por un científico realmente extraordinario: Michael Faraday (Newington, Gran Bretaña, 1791-Londres, 1867). Su campo de trabajo era el estudio de las relaciones entre magnetismo y electricidad. En este punto te aclaro que tú ya has estudiado algunos temas de magnetismo y electricidad, e incluso has visto en los temas anteriores que hay una estrecha relación entre las corrientes eléctricas y el magnetismo.

Pues todo esto también lo sabía Faraday en su tiempo, pero él fue un poco más lejos y se planteó la siguiente cuestión:

Se sabe que las corrientes eléctricas crean a su alrededor campos magnéticos, ¿podrán los campos magnéticos producir una corriente eléctrica? Y ahí empezó todo. Realizó un conjunto de experiencias que verás en seguida que sentaron cátedra, es decir, las bases necesarias para "domesticar" la electricidad. El resto, sus repercusiones, etc. ya lo puedes imaginar, aunque en este tema también verás algunas de las enormes aplicaciones de sus experimentos.

Como muestra, un botón. La imagen siguiente representa un alternador industrial. La misma representa un dispositivo capaz de "fabricar" una corriente eléctrica, o lo que es lo mismo las partículas que la constituyen tienen una velocidad, por ello, energía cinética, que con el aparato puede ser transformado a energía potencial y distribuirse para realizar operaciones mecánicas como hacer funcionar tu televisor o el ordenador donde estás sentado ahora.



Imagen de Xaf en [Flickr](#) . CC

## Curiosidad

No debes considerar a Michael Faraday como uno más de los muchos nombres que aparecen en cualquier libro de texto. Fue un científico brillante que nació en el seno de una familia humilde, recibiendo una educación básica. Muy joven se vio obligado a trabajar, primero como repartidor de periódicos, y a los catorce años en una librería, donde tuvo la oportunidad de leer algunos artículos



donde tuvo la oportunidad de leer algunos artículos científicos que lo impulsaron a realizar sus primeros experimentos.

Albert Einstein (este sí te suena ¿verdad?) mantenía colgado en la pared de su estudio un retrato de Faraday junto a los de Isaac Newton y James Clerk Maxwell. Ernest Rutherford (seguro que este también) declaró: "Cuando consideramos la extensión y la magnitud de sus descubrimientos y su influencia en el progreso de la ciencia y de la industria, no existen honores que puedan retribuir la memoria de Faraday, uno de los mayores descubridores científicos de todos los tiempos

Cuenta la anécdota que un día de la primavera de 1855 el ya físico inglés Michael Faraday daba una conferencia pública en la que mostraba sus pioneros experimentos sobre la electricidad y el magnetismo. Entre la audiencia se encontraba William Gladstone, entonces Ministro de Hacienda y futuro Primer Ministro. Gladstone se levantó y le espetó al investigador: *«todo esto es muy bonito, ¿pero alguna vez le encontraremos una aplicación práctica?»*, a lo que Faraday respondió: *«no se preocupe, algún día el gobierno cobrará impuestos sobre esto»*. Estoy convencido de que ni siquiera Faraday sospechaba hasta qué punto sus experimentos revolucionarían el mundo.



Imagen en [Wikimedia Commons](#).

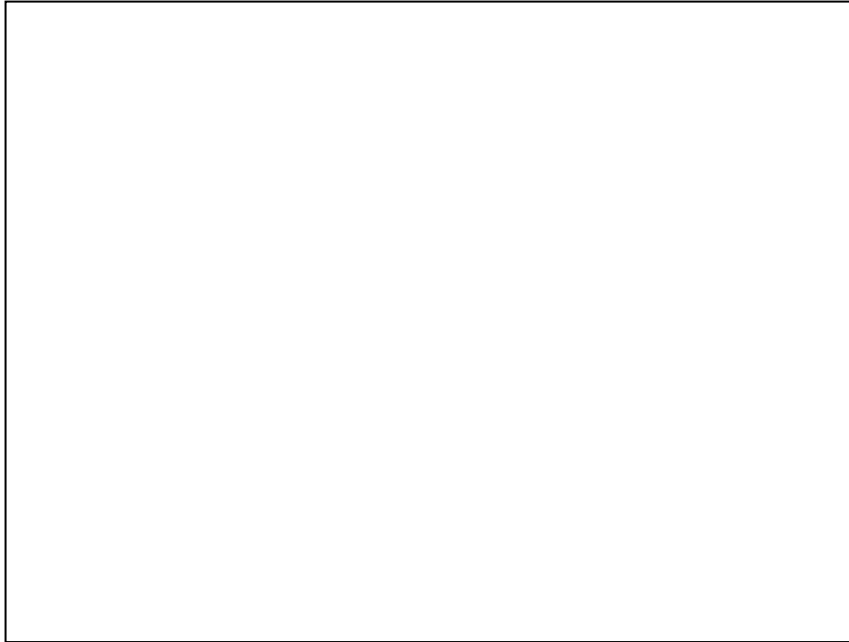
[Dominio público](#)

## 2. Generación de corriente eléctrica

---

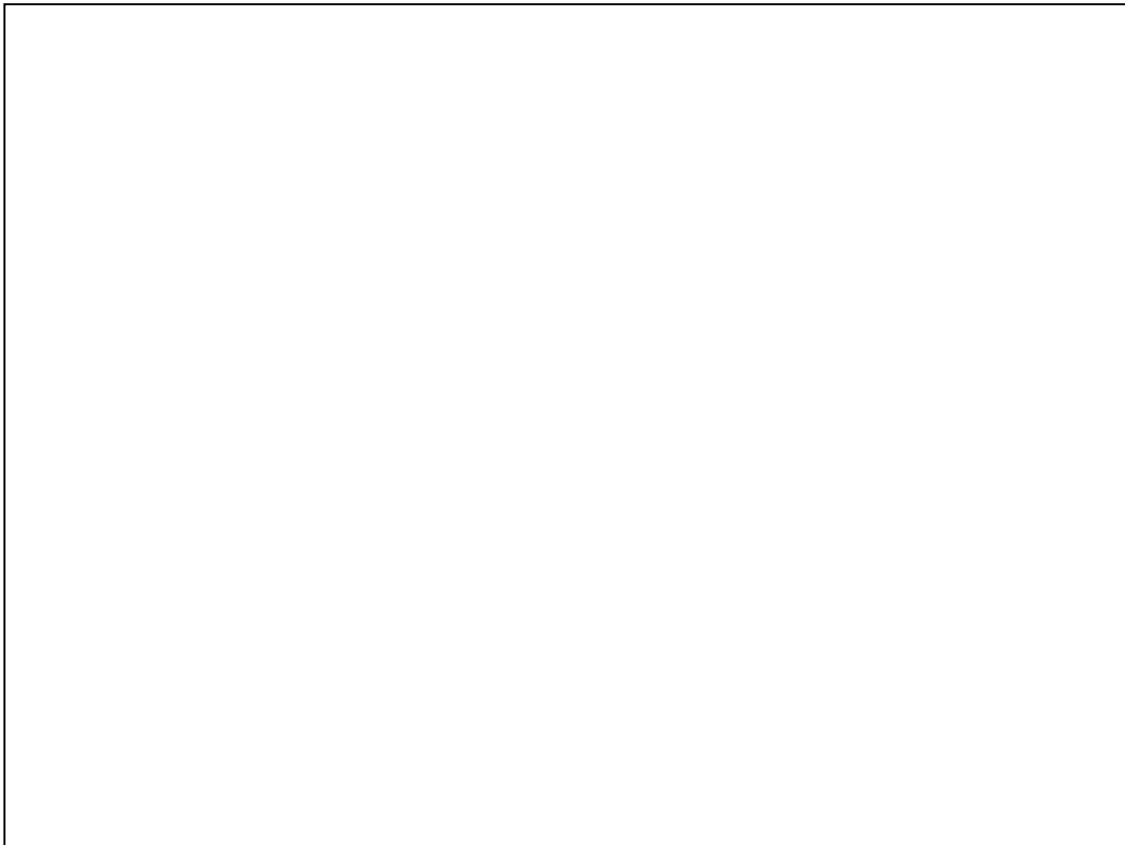
Faraday pensó que una forma de comprobar si el magnetismo puede crear una corriente eléctrica en un conductor es poner un circuito cerrado (una bobina por ejemplo) cerca de un imán y ver qué pasa.

Lo que ocurre es muy curioso. Si metemos un imán en una bobina que esté conectada a un amperímetro, observamos paso de corriente sólo cuando introducimos o sacamos el imán, pero no cuando el imán está dentro, como se puede ver en este vídeo:



Vídeo de fq-experimentos alojado en [Youtube](#)

La siguiente simulación reproduce este experimento. Coge el imán con el ratón y acércalo (o aléjalo) de la bobina.



Simulación alojada en [phet-Universidad de Colorado](#). CC

Pero esta no es la única forma de producir corriente. Otra forma es la que puedes observar en la siguiente animación. Fíjate bien porque la bobina 1 está enchufada a la corriente, pero la bobina 2 no. Cuando por la bobina 1 circula corriente alterna, se induce corriente en la 2 siempre. Si la corriente que circula por la bobina 1 es continua, sólo aparece en la bobina 2 corriente inducida al cerrar o abrir el interruptor.

Bien, ya has visto que no hay una sola forma de producir corriente, se te han mostrado algunos casos en los que se induce corriente en un circuito. Hay más posibilidades, pero se irá poco a poco, no es bueno atiborrarse, más adelante habrá más. Lo que interesa ahora es saber por qué se induce corriente.

## 2.1 Flujo magnético

¿Qué tienen en común todas las experiencias que hemos visto? Lo vas a ver en seguida, pero déjame que te explique algo antes, después verás por qué. De momento, fíjate en la figura siguiente, representa un campo magnético constante atravesando una superficie circular. Como puedes ver, el número de líneas de campo que atraviesan la superficie depende varias cosas:

1. Del tamaño del círculo (área del círculo  $S$ ).
2. De la "densidad de líneas", es decir, de lo juntas o separadas que estén las líneas (magnitud de  $B$ ).
3. De la orientación de  $\vec{S}$  respecto a  $\vec{B}$ . Claramente, si  $\vec{S}$  es paralelo a  $\vec{B}$ , el número de líneas es máximo, y si son perpendiculares, nulo.

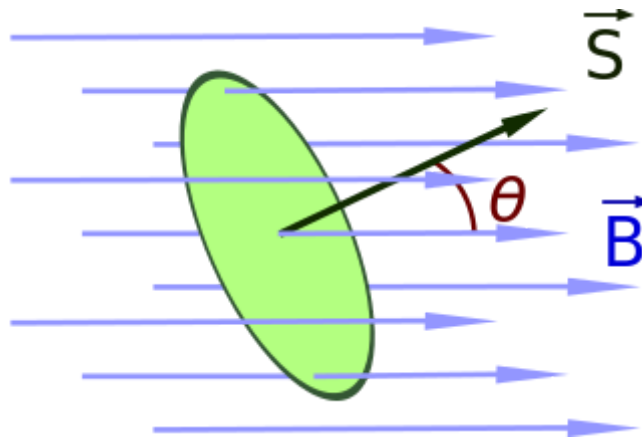


Imagen de Jfmelero en [Wikimedia Commons](#). CC

Pues bien, resulta que hay una magnitud física que mide el número de líneas de campo que atraviesa una determinada superficie. Se llama **flujo magnético**  $\Phi_m$  y se define de la siguiente forma: El flujo de un campo magnético  $\vec{B}$  a través de una superficie  $\vec{S}$  es el producto escalar de los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$ , es decir:

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

Donde  $\vec{S}$  es un vector cuyo módulo es igual al área de la superficie y su dirección perpendicular a la misma. La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional de Unidades es el Weber. Claramente  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

¿Y qué tiene que ver esto con las experiencias de Faraday que hemos visto en el apartado anterior? Muy fácil, **en todas las experiencias de inducción** de corriente eléctrica en un conductor **hay una variación del flujo magnético** que atraviesa el circuito.

¿No lo crees? Piensa:

- Cuando se acerca o se aleja un imán a una bobina modificamos el valor de  $B$  y, por tanto, el flujo.
- Cuando se conecta la bobina 1 a una corriente alterna, el campo que crea es variable y, por tanto el flujo que atraviesa la bobina 2 también lo es.
- Cuando se enciende o se apaga un interruptor en la bobina 1, la intensidad de corriente cambia hasta que toma el valor definitivo (en un breve intervalo de tiempo). Este breve cambio de corriente genera un flujo magnético en la bobina 2 que cambia en un breve intervalo de tiempo.

Es posible imaginar otros procedimientos por los que puede cambiar el flujo magnético, pero se dejarán para apartados posteriores.

Por último, aclararte que se ha definido el flujo del campo magnético para el caso en que  $\vec{B}$  sea constante en toda la superficie. Si el campo fuera variable, la expresión del flujo es mucho más general, y se expresa mediante una integral:

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

## Comprueba lo aprendido <sup>e</sup>

Una espira atraviesa una región del espacio en la que existe un campo magnético uniforme, vertical y hacia arriba. La espira se mueve en un plano horizontal. Señala en qué casos circula corriente por la espira:

☐ está penetrando en la región del campo

☐ mientras se mueve en dicha región

☐ cuando está saliendo

### Mostrar retroalimentación

#### Solution

1. Correcto
2. Incorrecto
3. Correcto

### 3. Fuerza electromotriz

Para empezar, un breve recordatorio de algunas cuestiones que probablemente ya sepas de cursos anteriores. Para que circule corriente eléctrica por un circuito son necesarias dos condiciones:

- Que el circuito esté cerrado
- Que entre dos puntos del mismo se mantenga una diferencia de potencial

Fíjate en el dibujo de más abajo, a la izquierda, representa un niño que recoge las bolas que llegan abajo y las eleva al tobogán de arriba. Está claro que, para mantener la corriente de bolas por los toboganes, el niño es fundamental, él es el que realiza un trabajo sobre cada bola, aumentando su energía (potencial) para que pueda seguir circulando por el circuito.

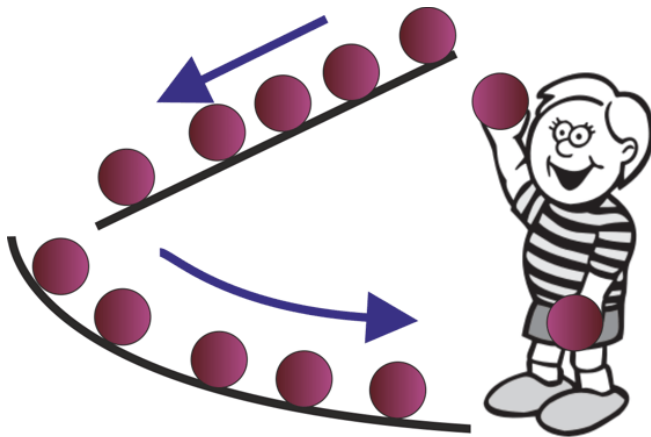
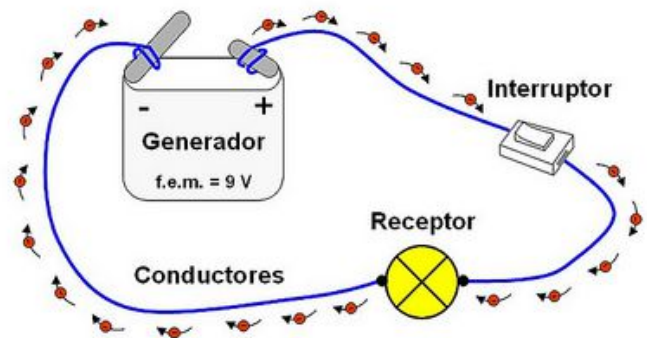


Imagen de Juancarcole en [Wikimedia Commons](#). CC

### Circuito eléctrico



▪ Sentido convencional de la corriente

Imagen de José Luis Montalvillo en [Flickr](#). CC

Por la misma razón, para que circulen cargas eléctricas por un circuito como la imagen de arriba a tu derecha es preciso que haya un dispositivo que realice un trabajo sobre las cargas, suministrándole energía para que puedan circular por el conductor. Este dispositivo es, por ejemplo, una pila. Al igual que el niño mantiene una diferencia de altura entre dos puntos del circuito de toboganes, la pila lo que hace es mantener una diferencia de "altura eléctrica" entre dos puntos del conductor. Esta diferencia de "altura eléctrica" es la diferencia de potencial entre los polos de la pila.

Bien, una vez aclarado esto, se puede definir la **fuerza electromotriz** (fem) como el trabajo que hay que realizar sobre la unidad de carga para que circule corriente por el circuito. Su unidad en el sistema internacional es el **voltio**, y matemáticamente se expresa así:

$$\epsilon = \frac{W}{q}$$

Y ahora que sabes qué es la fem, te haré retornar al pasado, es decir, a los fenómenos de inducción. Ya conoces que, cada vez que cambia el flujo magnético en un circuito, se induce en él una corriente, que se caracteriza por la fuerza electromotriz  $\epsilon$ . Pues bien, **la ley de Faraday** establece la relación entre variación de flujo y fem. Dice así:

La **fuerza electromotriz inducida** en un circuito es igual a la velocidad con que varía el flujo magnético a través de dicho circuito cambiada de signo. Matemáticamente se escribe así:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

Seguro que no es la primera derivada que has visto, así que no debería asustarte esta expresión. De todas formas, debes saber que, si la variación de flujo se produce de manera regular, esta expresión se convierte en esta otra:

$$\epsilon = -\frac{\Delta\Phi_m}{\Delta t}$$



También podría calcularse la intensidad de corriente, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Como ves, se ha identificado la fem con la diferencia de potencial. Esto es así en todos los casos que se van a estudiar.



### 3.1. Sentido de la fem inducida

Si eres un poco observador te habrás dado cuenta que, en la ley de [Faraday](#), se ha colado un signo menos que parece no venir a cuento. Bien, debes saber que el signo menos es la aportación de Heinrich Lenz a la ley de Faraday. Aunque es sólo un palito, la aportación de Lenz es tan decisiva y fundamental que la ley se suele llamar **ley de Faraday-Lenz**.

Este tributo de [Lenz](#) viene a exponer que **el sentido de la corriente inducida** es tal que siempre **se opone a la variación de flujo que la ha producido**, lo cual no es otra cosa que la aplicación del principio de conservación de la energía a este proceso.

Unos ejemplos pueden aclararte esto:

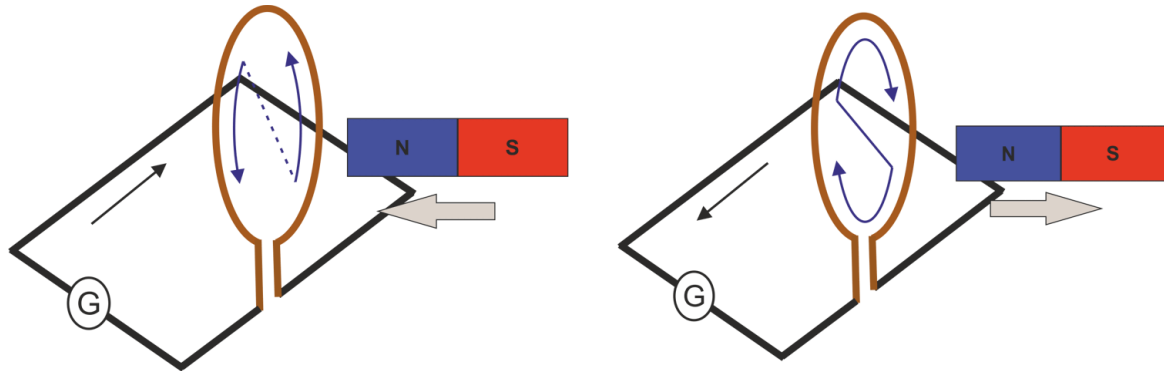


Imagen de Juancarcole en [Wikimedia Commons](#). CC

La imagen de la izquierda representa un imán acercándose a una espira. Como consecuencia de esto, en la espira se induce una corriente cuyo sentido es tal que repele al imán, para contrarrestar su acercamiento. Ya sabes que una espira por la que circula una corriente equivale a un imán cuyo polo norte lo conoces por la regla de la mano derecha. Pues bien, fíjate que el sentido de la corriente es tal que la espira presenta su polo norte para repeler al polo norte del imán.

En la imagen de la derecha, el polo norte se aleja. Para contrarrestar esto, la espira presenta su polo sur atrayendo al polo norte del imán. Las letras N y S son una regla que puede serte útil a la hora de conocer el sentido de la corriente.

También puedes echar un vistazo a [esta página](#) para ver una animación sobre la ley de Lenz.

### Comprueba lo aprendido

Lee y completa

Los primeros científicos que la estudiaron la generación de corrientes eléctricas fueron  y , quienes observaron que para que apareciera el  de electrones se tenía que dar las siguientes circunstancias:

- Si se acerca un  al circuito, o se aleja del mismo.
- El  se desplaza con respecto al imán.
- Si hay un movimiento  entre el circuito y otro circuito por el que circule una corriente .
- Si el segundo circuito transporta una corriente , aunque ambos estén en reposo.
- Si se  el circuito en el seno de un campo magnético.

Para dar forma a todas estas circunstancias desde un punto científico se estableció la ley de Faraday-Lenz, que dice que la variación temporal del   $\Phi$  del campo magnético a través de un circuito genera en él una , que vista de otra forma se puede indicar que es el  por unidad de carga que se realiza en el circuito. Su unidad en el Sistema Internacional es el

**Comprobar respuesta**

## 4. Otros experimentos

En este apartado vas a ver otro procedimiento para conseguir una fuerza electromotriz. El procedimiento fue ideado por [Joseph Henry](#) de forma simultánea e independiente de Faraday.

Fíjate en la figura de la derecha. Si se mueve la barra conductora en el interior de un campo magnético hacia la derecha, las cargas de la misma se verán sometidas a una fuerza que, según vimos unos temas atrás es:

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Esta fuerza hace que las cargas positivas se desplacen hacia arriba y las negativas hacia abajo (recuerda la regla de la mano izquierda relativa al producto vectorial). La consecuencia es que se produce una acumulación de carga positiva arriba y de carga negativa abajo, y esto produce un campo eléctrico dirigido hacia abajo.

El proceso ocurre mientras  $F_m > F_e$ . El desplazamiento de cargas termina cuando ambas fuerzas son iguales, es decir:

$$F_m = F_e \rightarrow qvB = qE \rightarrow E = vB$$

Este campo inducido genera una diferencia de potencial entre los extremos de la barra que vale:

$$\Delta V = E \cdot l = vBl$$

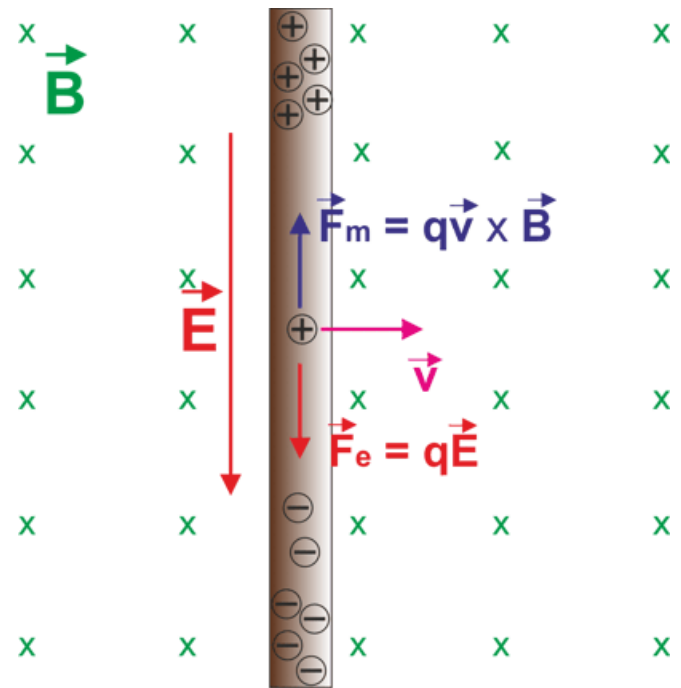


Imagen de Juancarcole en [Wikimedia Commons](#). CC

**Nota de interés:** A todos los efectos, a lo largo de este tema, los términos *diferencia de potencial*, *caída de tensión*, *voltaje* o *fuerza electromotriz* serán sinónimos, utilizando el término *fuerza electromotriz* para los casos en que tengamos cargas moviéndose a través de un circuito cerrado.

### Reflexiona

Si en la experiencia de Henry unimos los extremos de la barra móvil con un conductor, tal como indica la imagen, tendremos un circuito cerrado por el que circulará corriente. ¿Se puede aplicar la ley de Faraday para calcular la fem del circuito?



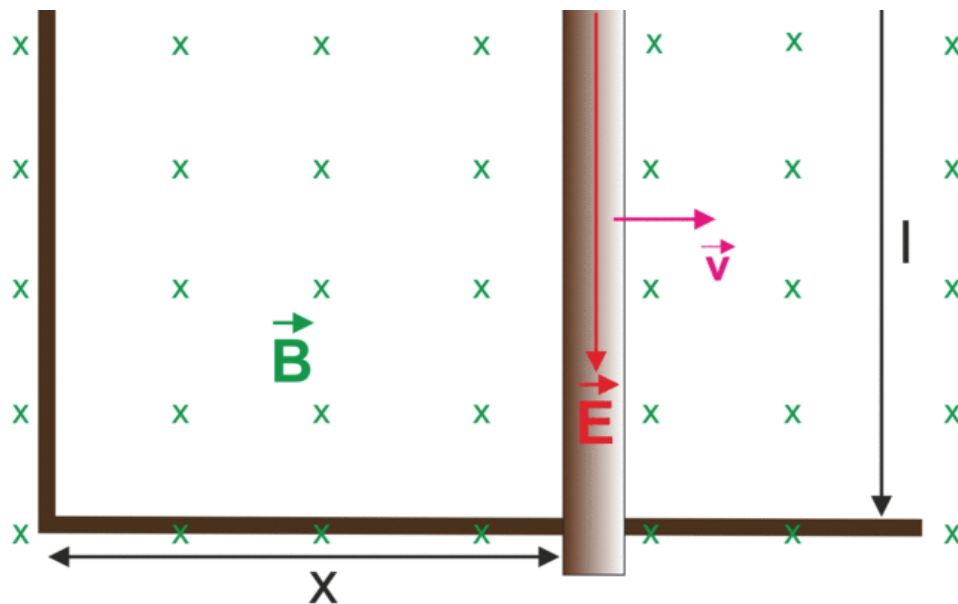


Imagen de Juancarcoleen [Wikimedia Commons](#). CC

### Mostrar retroalimentación

Desde luego que sí. Basta con tener en cuenta que, conforme avanza la varilla conductora, el área del circuito atravesada por el campo magnético aumenta (o disminuye, según sea el sentido de movimiento de la varilla).

Tal como se ve en la imagen, el flujo magnético cambia al cambiar la superficie  $S$ :

$$S = l \cdot x$$

Conforme avanza la varilla, el flujo va cambiando porque  $x$  va cambiando, y el cambio de  $x$  representa precisamente la velocidad de la varilla, es decir:  $v = \frac{dx}{dt}$ . Por lo tanto:

$$\Phi_m = B \cdot S = B \cdot l \cdot x$$

Finalmente, la fuerza electromotriz, prescindiendo del sentido de la corriente, será:

$$\epsilon = \frac{d\Phi_m}{dt} = B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot l \cdot v$$

## Reflexiona

¿Puede crearse una diferencia de potencial entre las alas de un avión?

### Mostrar retroalimentación

Por supuesto, el avión vuela por la atmósfera a cierta velocidad y la Tierra tiene un campo magnético



consecuentemente se produce el fenómeno anteriormente descrito.



Imagen de Magnus Manske

en [Wikimedia Commons](#). Dominio público

## 5. Autoinducción

A veces ocurre que al entrar en una habitación y se acciona el interruptor para encender o apagar la luz, se produce un chispazo. Aunque te parezca extraño, en el interruptor ha ocurrido algo parecido a lo que ocurre en la atmósfera cuando vemos un rayo, pero la causa última es distinta, es debido a la llamada autoinducción.

Para entender este fenómeno debes comprender que las variaciones de flujo que pueden generar corrientes inducidas no tienen por qué ser causadas por un factor externo. Por ejemplo, imagina un circuito simple formado por una fuente de corriente (en la imagen  $u(t)$ ), y una bobina. Al abrir o cerrar el circuito, durante un breve intervalo de tiempo la bobina es atravesada por una intensidad variable, que ocasiona un flujo magnético variable en ella misma, lo cual a su vez genera una fuerza electromotriz inducida en el propio circuito, que provoca una fuerte caída de tensión entre los extremos del interruptor. Esta caída de tensión (o diferencia de potencial) elevada es la que desencadena el chispazo, al igual que los rayos se producen por una gran diferencia de potencial entre el suelo y la nube.

Según la ley de Lenz, si la autoinducción ocurre por disminución de la intensidad, el sentido de la corriente autoinducida es el mismo que el de la corriente inicial, o si la causa es un aumento, el sentido es contrario al de esta corriente.

Además puede demostrarse que para cualquier circuito el flujo que lo atraviesa siempre es proporcional a la intensidad de corriente que circula por el, es decir:

$$\Phi = L \cdot I$$

así que la fuerza electromotriz autoinducida se podrá escribir así:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

La constante de proporcionalidad **L** se denomina **coeficiente de autinducción** y se mide en henrys, en algunos libros aparece como henrios.

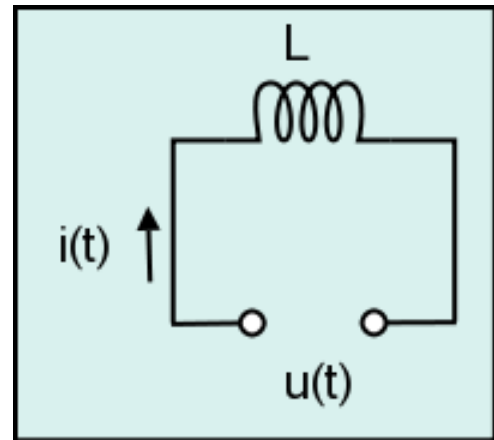


Imagen de José Luis Gálvez en [Wikimedia Commons](#). Dominio Público

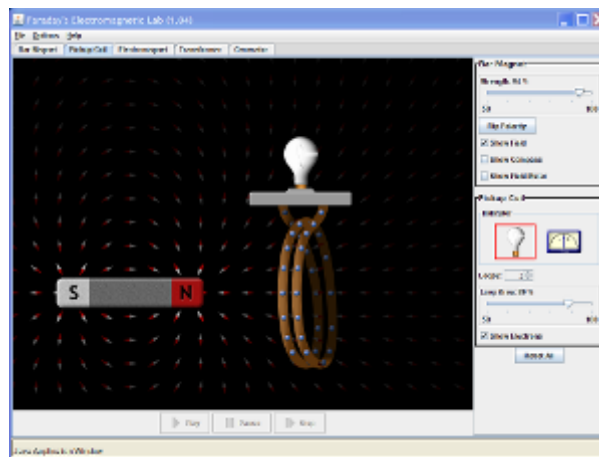
## 6. Aplicaciones de la inducción

Bueno, bueno,... continuaré hablando de corrientes inducidas, es decir, de fabricar electricidad. Hasta aquí he intentado contestar a las preguntas ¿cómo?, y ¿por qué? A partir de ahora la pregunta es: ¿y qué?

Está claro que se puede crear una corriente eléctrica cambiando el flujo que atraviesa un circuito, pero la idea es hacerlo sin que nadie tenga que estar moviendo un imán o una varilla, entre otras posibilidades.

Lo que se desea es poseer un mecanismo de variación de flujo que favorezca el movimiento de electrones mientras uno esté tranquilamente sentado en el sofá de casa.

En este apartado vas a ver cómo se consigue, también te facilitaré las claves para poder cambiar el voltaje producido y por qué esto es interesante pero, de momento, aquí tienes una simulación que es llamada *laboratorio virtual de Faraday*. Si la trasteas un poco serás capaz de vislumbrar las posibilidades que hay de variar el flujo que atraviesa un circuito.





## 6.1. Generador eléctrico

Ya has visto que, si se produce una corriente eléctrica en un circuito, se debe hacer que este circuito sea atravesado por un flujo magnético que vaya cambiando.

Eso se consigue, por ejemplo acercando o alejando un imán de un circuito, o moviendo una varilla tal como indica la experiencia de Henry.

Pero existe otra posibilidad de modificar el flujo, que es variando el ángulo que forman los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$ . Una modalidad de conseguir esto, es haciendo girar una espira en el interior de un campo magnético. Pero como una imagen vale más que mil palabras, ¡uy! perdón, una animación, mejor mira y trastea con la siguiente:

El ángulo que forman  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$  está relacionado con la [velocidad angular](#) de la espira mediante la ecuación:

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

por lo que el flujo magnético que atraviesa la espira cambia con el tiempo de la siguiente forma:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos\theta = BS \cos(\omega t + \theta_0)$$

y, consecuentemente, se induce una fem en la espira que puede calcularse a partir de la ley de Faraday Lenz

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \operatorname{sen}(\omega t + \theta_0)$$

Si en lugar de una espira gira una bobina con N espiras, las expresiones anteriores quedan así:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = NBS\omega \operatorname{sen}(\omega t + \theta_0)$$

$$\epsilon_0 = NBS\omega \quad ; \quad \epsilon = \epsilon_0 \operatorname{sen}(\omega t + \theta_0)$$

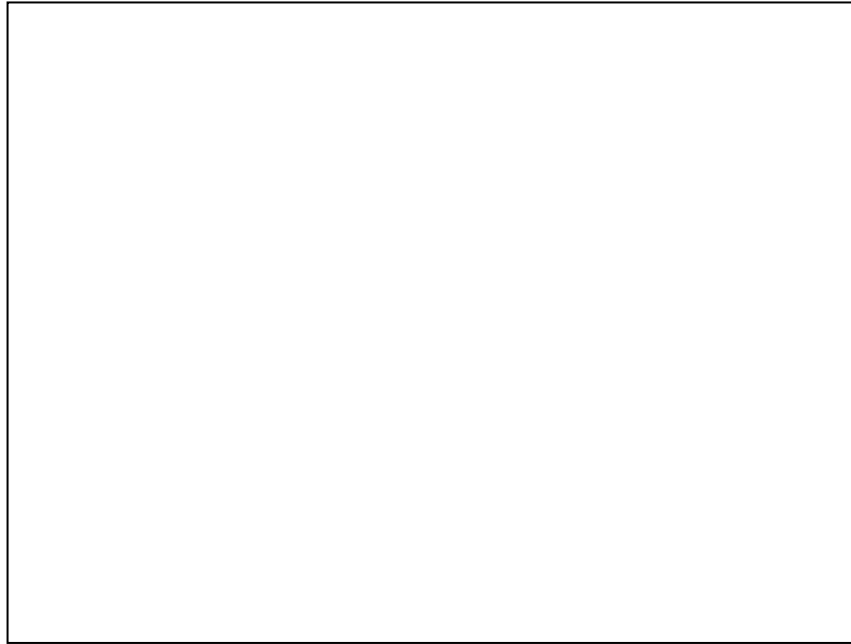
Resumiendo, si se hace girar un circuito en el interior de un campo magnético, se induce en él una corriente cuya fuerza electromotriz es  $\epsilon = \epsilon_0 \operatorname{sen}(\omega t + \theta_0)$

Ya sabes que el seno es una función que toma valores comprendidos entre +1 y -1. Esto significa que la fuerza electromotriz inducida en este circuito oscilará entre  $\epsilon_0$  y  $-\epsilon_0$ . Por ello la fuerza electromotriz es alterna y a un dispositivo de este tipo se le llama alternador.

El dispositivo permite producir cambios entre dos sistemas de tal manera que la energía mecánica que posee la espira que gira es transferida a los electrones que comienzan a moverse. Un motor ofrece la

alternativa contraria la energía cinética de los electrones es transferida a los engranajes del motor que adquieren movimiento.

El siguiente vídeo te lo puede aclarar:



Vídeo de Xavier Rosell Ezquerro alojado en [Youtube](#)

## Comprueba lo aprendido e

Una espira circular gira en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético uniforme. Razone si se induce fuerza electromotriz en la espira si:

☐ Es perpendicular al eje de rotación

☐ El campo magnético es paralelo al eje de rotación

### Mostrar retroalimentación

#### Solution

1. Correcto
2. Incorrecto

## 6.2 Transformador eléctrico

¿Has visto alguna vez un transformador? Antiguamente (bueno, no tanto, en tiempo de tus abuelos) en casi todas las casas había un transformador, porque la caída de tensión (o diferencia de potencial, o fuerza electromotriz) que llegaba a casa podía ser de 220 V o de 125 V, y los aparatos electrodomésticos necesitaban variar la tensión de funcionamiento para que su rendimiento fuera el correcto.

Como ves en el esquema de la figura, un transformador consta de dos bobinas, llamadas primario y secundario, unidas por un núcleo de hierro, cuya función es la conducción del flujo magnético a su través.

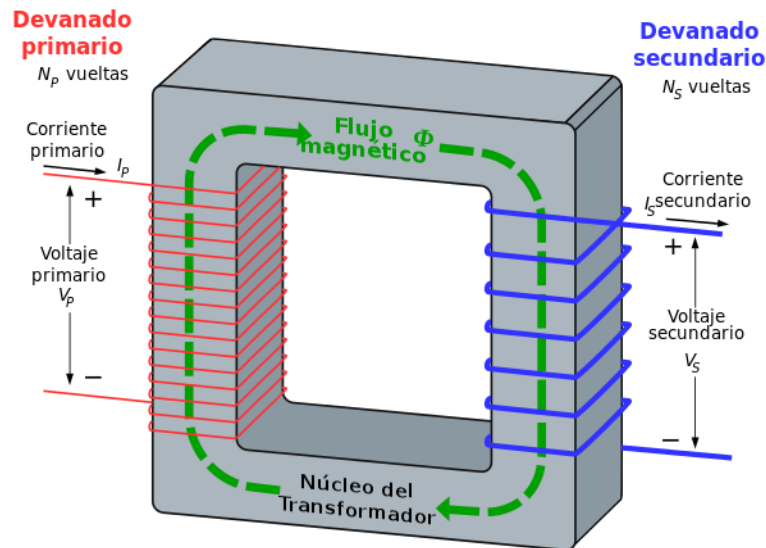


Imagen de KundaliniZero en [Wikimedia Commons](#). GNU

La idea de funcionamiento de este chisme consiste en conectar el primario a una corriente alterna. Como la intensidad de la corriente alterna es cambiante con el tiempo, el campo magnético que crea, y que atraviesa el primario, también es variable. Esto produce un flujo magnético variable que recorre el secundario y que, según la ley de Faraday, induce una corriente en él.

En resumen, se conecta el primario a una corriente alterna y aparece una corriente inducida en el secundario. Para conocer las características de la corriente inducida se tiene que hacer algunas cuentas.

Al conectar el primario a una corriente alterna, ésta producirá un campo magnético que penetra en el primario y secundario. Si se aplica la ley de Faraday, la caída de tensión (o fuerza electromotriz) en ambos es:

$$V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \quad V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt}$$

En un transformador ideal, ambos flujos magnéticos son iguales, así que se deduce:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \rightarrow V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

Al cociente  $N_s/N_p$  se le llama relación de transformación. Para que veas su utilidad te propongo un breve ejercicio

### *Ejercicio resuelto*

Un transformador está constituido por dos bobinas de 500 vueltas (primario) y 3000 vueltas (secundario).

¿Cuál será la tensión de salida si se aplica en el primario una tensión de 60 V?

**Mostrar retroalimentación**

#### Mostrar retroalimentación

Si se despeja la tensión del secundario en la relación de transformación, se obtiene:

$$V_S = \frac{N_s}{N_P} V_P = \frac{3000}{500} 60 = 3600 \text{ V}$$

Si se tiene un electrodoméstico que funciona sólo a 125 V, ¿Cuál debe ser la relación de transformación entre los devanados del primario y secundario para que podamos conectar el aparato a 220 V?

#### Mostrar retroalimentación

La relación de transformación es

$$\frac{N_s}{N_P} = \frac{V_s}{V_P} = \frac{125}{220} = 0.57$$

Es decir, que si el primario tuviera, por ejemplo, 1000 vueltas, el secundario debería tener  $1000 \cdot 0.57 = 570$  vueltas

### Comprueba lo aprendido

Razona si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones:

La fuerza electromotriz inducida en una espira es proporcional al flujo magnético que la atraviesa.

☐ Verdadero ☐ Falso

#### Falso

Es falso porque la fem inducida es proporcional a la variación de flujo magnético, no al flujo magnético.

Un transformador eléctrico no puede utilizarse con corriente continua.

☐ Verdadero ☐ Falso

#### Verdadero

Es cierto. Si la corriente es continua no hay variación de corriente en el primario (excepto al conectar y desconectar la corriente), por lo tanto no hay modificación del campo magnético y, finalmente, no hay cambio en el flujo magnético que atraviesa el primario.

Esta es la condición para que se induzca una fem en el secundario.

## 7. Producción y transporte eléctrico

### PRODUCCIÓN

¿Recuerdas cómo se inició el tema? Se partía de una afirmación: La electricidad ha cambiado nuestras vidas a mejor. Imagino que estarás de acuerdo, además ahora puedes comprender por qué está tan extendido el uso de la electricidad. Fundamentalmente se debe a la facilidad de producción, transformación y transporte.

Para conseguir el movimiento de electrones basta con idear un mecanismo que haga girar una turbina (recuerda el funcionamiento de un generador). Este giro se consigue de varias formas:

- En una central hidroeléctrica se aprovecha la caída del agua de un embalse; en la parte más alta, el agua posee energía potencial gravitatoria que va transformando a cinética en el descenso al chocar con unas aspas hacen que estas giren.
- En una central térmica (convencionales o de ciclo combinado), las turbinas giran por acción del vapor de agua que se obtiene en una caldera tras calentar agua, haciendo que aumente el movimiento de las partículas de agua por medio de una transformación química como el quemando carbón, petróleo o gas natural.
- En una central nuclear el giro se produce también por la acción del vapor de agua, pero el cambio de estado del agua y su aumento de temperatura se realiza gracias a procesos de fisión, ruptura de núcleos de átomos, que se producen en el núcleo del reactor.
- En una central eólica, las partículas del aire chocan contra las aspas de los aerogeneradores haciendo que estos giren, es decir, la energía cinética de los constituyentes del aire es transferida a las palas y gracias a su giro se crea la corriente eléctrica.

### TRANSPORTE

A primera vista, viendo la relación de transformación deducida en el apartado anterior, podríamos pensar que la energía no se conserva en un transformador. ¿Cómo, si no, podemos obtener una tensión mayor en el secundario que la tensión a la que conectamos el primario?

Tranquilo, no pasa nada. Es evidente que caída de tensión y energía no son la misma cosa. Sin embargo, conviene recordar un par de cosas:

1) Entre caída de tensión, intensidad de corriente y potencia eléctrica (energía transportada por unidad de tiempo) existe la relación simple:

$$P = I \cdot V$$

2) La pérdida de potencia en una línea de corriente, por efecto Joule, es:

$$P = I^2 \cdot R$$

Así que si queremos transportar corriente eléctrica, conviene hacerlo a intensidades bajas, para evitar pérdidas en calor por efecto Joule. Esto obliga a **transportar la corriente a voltajes elevados**.



Imagen de Rjcastillo en [Wikimedia Commons](#). CC

Ya ves que tienen sentido las líneas de alta tensión que se ven por la carretera. Este es el camino de la electricidad desde su producción hasta nuestras casas:

- La corriente eléctrica se produce en la central hidroeléctrica, térmica, nuclear, ..
- Se distribuye mediante corriente alterna, que permite la utilización de los transformadores para elevar y reducir el voltaje.
- A la salida de la central eléctrica la tensión se eleva desde aproximadamente 4000 V hasta unos 400 000 V
- Es transportada por una línea de alta tensión.
- En las cercanías de las ciudades se reduce el voltaje (otra vez los transformadores) hasta 15000 V en las estaciones de transformación.
- En algunos edificios se sitúan subestaciones que pasan la tensión a 380 V para ser utilizada en las viviendas a 220 V.

## 8. Impacto ambiental de la energía eléctrica

Aunque los procesos de transformación que permiten crear la corriente eléctrica y llevarla a nuestros hogares, se considera un proceso "limpio", sin embargo, "no todo el monte es orégano". Lo cierto es que ocasiona impactos medioambientales en los lugares de producción y transporte. Por ejemplo, en los lugares donde se produce, el impacto ambiental está relacionado con la materia prima utilizada, no es lo mismo producir energía eléctrica quemando carbón que aprovechando un salto de agua.

Echa un vistazo a la galería de imágenes siguiente, muestra unas cuantas centrales eléctricas, cada una con sus pros y sus contras.



### Galería de imágenes



Ya ves que la incidencia sobre el medio ambiente tiene mucho que ver con el tipo de central. Vamos a repasar brevemente cada una de las más importantes:

**Centrales hidroeléctricas:** no producen residuos tóxicos y tienen un rendimiento de transformación alto. La desventaja es que afectan seriamente los ecosistemas fluviales, ya que retienen la materia orgánica e inorgánica que era transportada por el río. Por esta razón, en los embalses siempre debe mantenerse un "caudal ecológico".

**Centrales térmicas:** producen residuos tóxicos (óxidos de azufre, nitrógeno y carbono, además, de partículas de polvo), el rendimiento en la transformación es del 30 % ya que parte de la energía que se puede traspasar desde los combustibles son cedidas al entorno. Las chimeneas altas se construyen para reducir estos residuos, inyectando calizas y precipitadores electrostáticos. Actualmente, las centrales de ciclo combinado consiguen rendimientos de hasta el 60 %.

**Centrales nucleares:** Tienen un rendimiento alto pero producen residuos radiactivos, que son contaminantes por su actividad radiológica y presentan problemas para su almacenamiento. Como son centrales térmicas, también comparten los efectos negativos de las pérdidas al medio por calor. En caso de accidente, existe riesgo de contaminación radiactiva.

**Centrales eólicas:** la energía primaria no produce residuos tóxicos. Los aerogeneradores tienen un impacto paisajístico y producen ruido, además de contaminar en grandes cantidades en el proceso de construcción.

Desde luego que uno de los problemas de este tipo de procesos de transformación de la energía gracias a las corrientes eléctricas se encuentra en la emisión de CO<sub>2</sub>. Ya sabes que en la actualidad existe un

movimiento social importante en favor de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera con objeto de reducir el impacto climático que podría producir un aumento descontrolado del mismo.



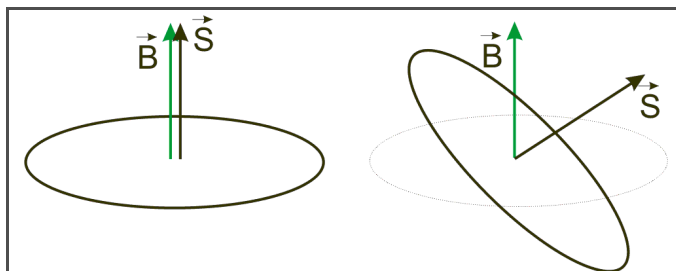
### Ejercicio resuelto

Una espira conductora de  $40 \text{ cm}^2$  se sitúa en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme de  $0,3 \text{ T}$ .

Calcule el flujo magnético a través de la espira y explique cuál sería el valor del flujo si se girara la espira un ángulo de  $60^\circ$  en torno a un eje perpendicular al campo.

#### Mostrar retroalimentación

Observa la imagen de la derecha. El flujo inicial y final son:



$$\Phi_0 = B \cdot S \cdot \cos 0 = B \cdot S = 0,3 \cdot 0,04 = 0,012 \text{ Wb}$$

$$\Phi_f = B \cdot S \cdot \cos 60 = B \cdot S = 0,3 \cdot 0,04 \cdot \frac{1}{2} = 0,006 \text{ Wb}$$

Si el tiempo invertido en ese giro es de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ , ¿cuánto vale la fuerza electromotriz media inducida en la espira? Explique qué habría ocurrido si la espira se hubiese girado en sentido contrario.

#### Mostrar retroalimentación

La calculamos a partir de la Ley de Faraday Lenz:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta \Phi_m}{\Delta t} = -\frac{\Phi_f - \Phi_0}{\Delta t} = -\frac{0,006 - 0,012}{3 \cdot 10^{-2}} \text{ V} = 0,2 \text{ V}$$

Si la espira gira en sentido contrario, se produciría la misma disminución de flujo y, por tanto, la fem sería la misma. Esto también puede entenderse observando que el  $\cos(-60) = \cos 60$ . Es decir, el flujo final sería el mismo:

$$\Phi_f = B \cdot S \cdot \cos(-60) = B \cdot S = 0,3 \cdot 0,04 \cdot \frac{1}{2} = 0,006 \text{ Wb}$$

### Ejercicio resuelto

Una espira circular de  $5 \text{ cm}$  de radio, inicialmente horizontal, gira a  $60 \text{ rpm}$  en torno a uno de sus diámetros en un campo magnético vertical de  $0,2 \text{ T}$ .

Dibuje en una gráfica el flujo magnético a través de la espira en función del tiempo entre los instantes  $t=0$  s y  $t=2$  s e indique el valor máximo de dicho flujo.

#### Mostrar retroalimentación

Inicialmente los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$  son paralelos, por lo que el flujo magnético es máximo e igual a  $\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot \pi \cdot r^2$ . A partir de aquí la espira gira de tal forma que el ángulo que forman los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$  está relacionado con la velocidad angular mediante la expresión  $\theta = \omega t$ . Por tanto, el flujo cambia con el tiempo de la siguiente forma:

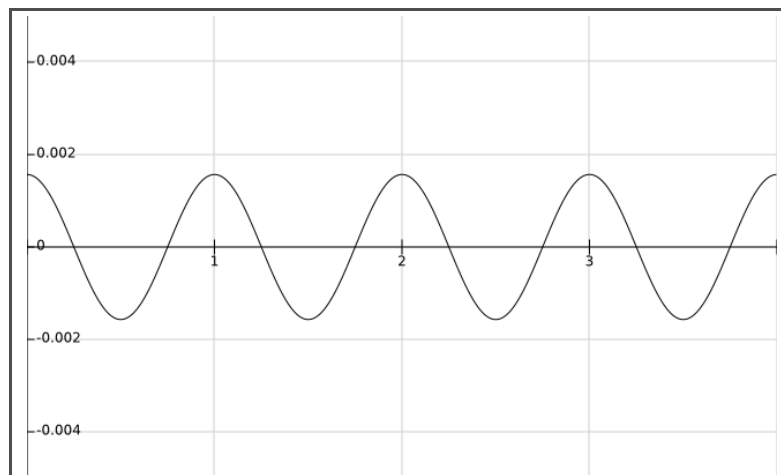
$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \cos(\omega t)$$

Con los datos de nuestro ejercicio:

$$\omega = \frac{60 \text{ rev}}{\text{min}} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\Phi_m = 1.57 \cdot 10^{-3} \cos(2\pi t) \text{ Wb}$$

La gráfica de esta función es la siguiente:



Escriba la expresión de la fuerza electromotriz inducida en la espira en función del tiempo e indique su valor en el instante  $t=1$  s.

#### Mostrar retroalimentación

Para escribir la expresión de la fem inducida utilizamos la ley de Faraday:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} = 1.57 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot \text{sen}(2\pi t) = 9.86 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(2\pi t) \text{ V}$$

Como ves, para  $t=1$  s el  $\text{sen}(2\pi)=0$  y, por tanto,  $\epsilon=0$

*Ejercicio resuelto*

Una espira cuadrada, de 30 cm de lado, se mueve con una velocidad constante de  $10 \text{ m s}^{-1}$  y penetra en un campo magnético de  $0,05 \text{ T}$  perpendicular al plano de la espira.

Explique, razonadamente, qué ocurre en la espira desde que comienza a entrar en la región del campo hasta que toda ella está en el interior del campo. ¿Qué ocurriría si la espira, una vez en el interior del campo, saliera del mismo?

### Mostrar retroalimentación

Al penetrar la espira en el campo se induce una corriente debido al aumento del flujo magnético que la atraviesa. Mientras se mueve en su interior las líneas de campo que la atraviesan son siempre las mismas, por tanto no cambia el flujo, y por tanto cesa la corriente inducida.

La corriente inducida aparece de nuevo cuando la espira sale del campo, en esta ocasión por una disminución del flujo magnético.

La siguiente imagen ilustra esto con indicación del sentido de la corriente inducida:



Calcule la fuerza electromotriz inducida en la espira mientras está entrando en el campo.

### Mostrar retroalimentación

Al entrar la espira, la superficie atravesada por el campo vale:  $S = l \cdot x$ ,  $l$  es la longitud del lado que se mueve perpendicular a la velocidad y  $x$  la longitud de los lados de espira que se mueven paralelos a la velocidad. Conforme la espira entra,  $x$  va aumentando, y conforme la espira sale,  $x$  va disminuyendo.

El flujo va cambiando entonces en la forma:

$$\Phi_m = B \cdot S = B \cdot l \cdot x$$

La fuerza electromotriz viene dada por la variación de flujo:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = -B \cdot l \cdot v = -0.15 \text{ V}$$

## Resumen

---

### Importante

Para que circule corriente eléctrica por un circuito son necesarias dos condiciones:

- Que el circuito esté cerrado
- Que entre dos puntos del mismo se mantenga una diferencia de potencial

### Importante

Hay una magnitud física que mide el número de líneas de campo que atraviesa una determinada superficie. Se llama **flujo magnético  $\Phi_m$**  y se define de la siguiente forma:

El flujo de un campo magnético  $\vec{B}$  a través de una superficie  $\vec{S}$  es el producto escalar de los vectores  $\vec{B}$  y  $\vec{S}$ , es decir:

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

Donde  $\vec{S}$  es un vector cuyo módulo es igual al área de la superficie y su dirección perpendicular a la misma.

La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional de Unidades es el Weber. Claramente  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

### Importante

**En todas las experiencias de inducción** de corriente eléctrica en un conductor **hay una variación del flujo magnético** que atraviesa el circuito.

### Importante

**El sentido de la corriente inducida** es tal que siempre **se opone a la variación de flujo** que la ha producido.



### AVISO DEL SERVIDOR

Por motivos de seguridad esta página web solo está accesible mediante acceso seguro (https):

[https://www.juntadeandalucia.es/Aviso\\_Legal\\_Andalucia\\_v04.htm](https://www.juntadeandalucia.es/Aviso_Legal_Andalucia_v04.htm)

Por favor, actualice sus marcadores. Gracias.

# Imprimible

---

Descargar imprimible