

# INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



## Introducción

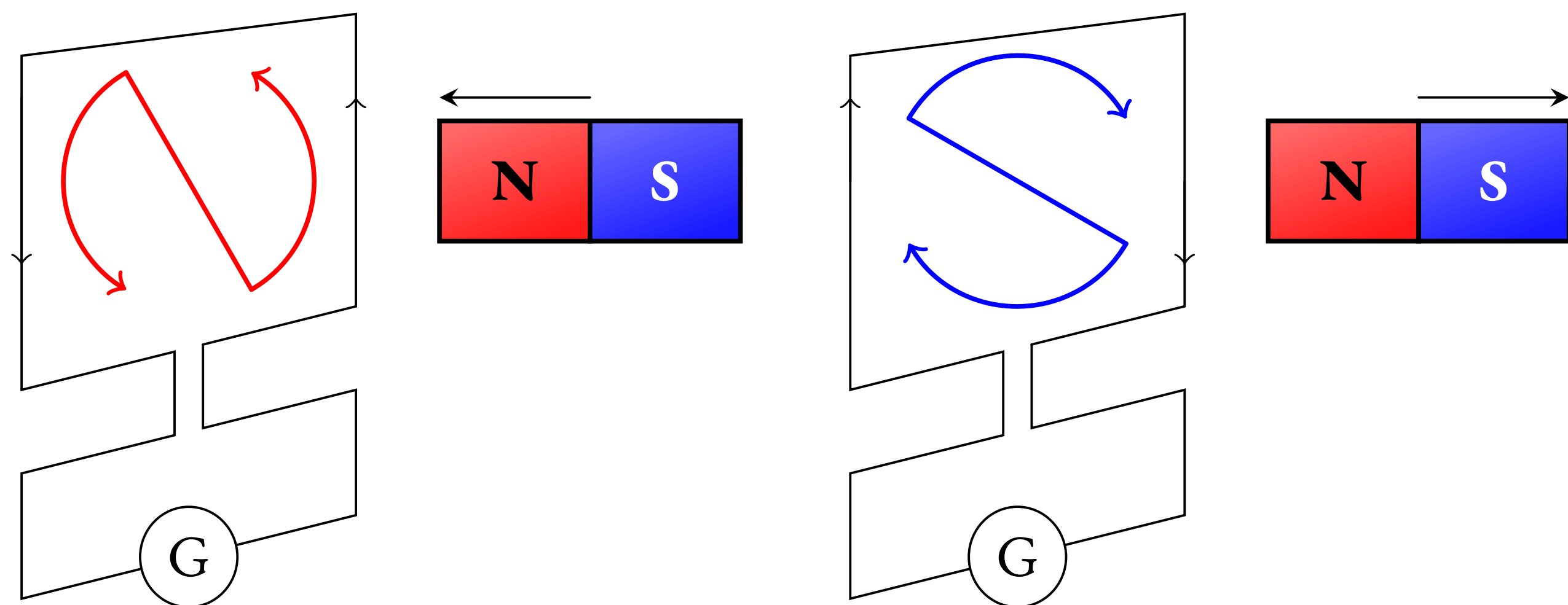
En el anterior tema vimos que el primer científico que relacionó la electricidad y el magnetismo fue ØRSTED (1777–1851). En sus experimentos, demostró que una corriente eléctrica era capaz de generar un campo magnético. Poco después, el físico MICHAEL FARADAY (1791–1867) llevó a cabo una serie de experiencias que le permitieron afirmar que la variación de un campo magnético puede inducir una corriente eléctrica (el proceso opuesto a Ørsted). Simultáneamente, otro científico estadounidense llamado JOSEPH HENRY (1797–1878) llegó a la misma conclusión, aunque publicó sus resultados algo más tarde que Faraday.

En este tema estudiaremos este fenómeno conocido como INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA: producción de una corriente eléctrica por la acción de un flujo magnético variable en el tiempo.

## Experiencias de Faraday

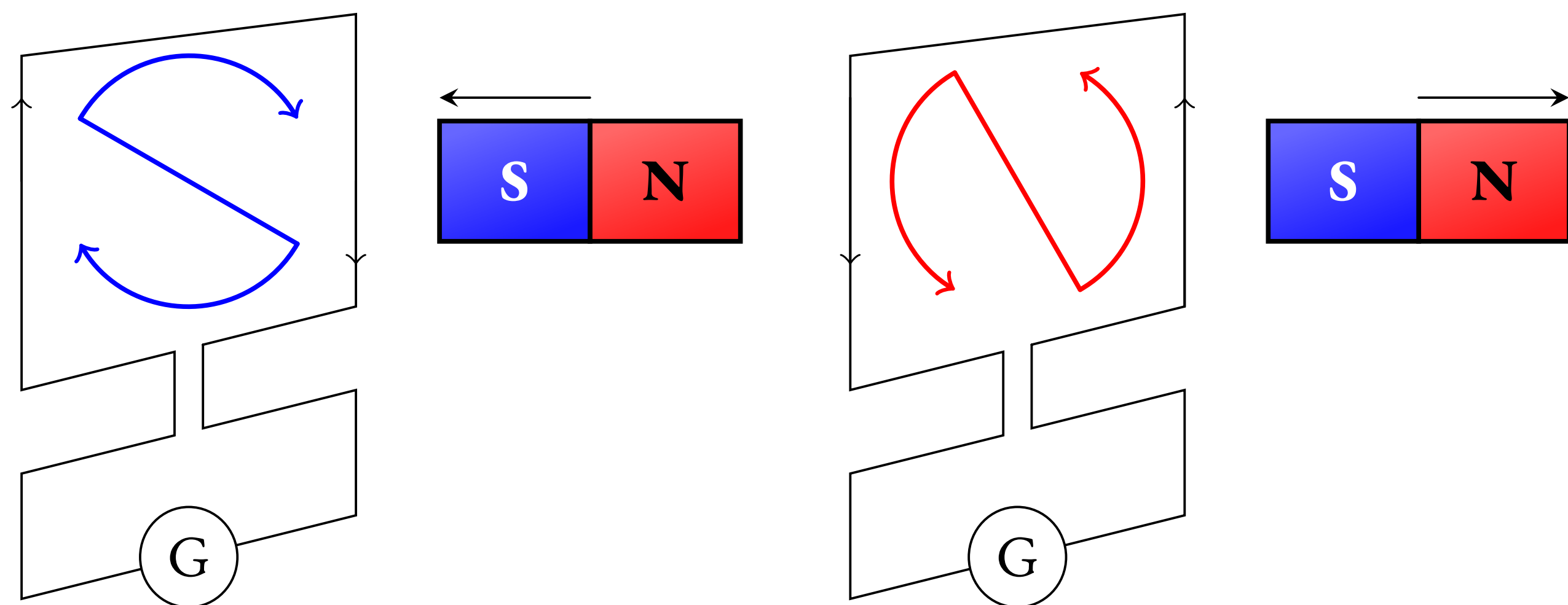
### 1ª experiencia

Se dispone de una espira conectada a un galvanómetro (dispositivo que mide, en este caso, el paso de corriente eléctrica  $I$ ). Se observa que si se aleja o se acerca un imán a la espira se produce en ella una corriente inducida, cuyo sentido depende del polo del imán que se emplee y si este se acerca o se aleja de la espira.



Al acercar el polo N se crea cara N que lo repele ( $I$  antihoraria).

Al alejar el polo N se crea cara S que lo atrae ( $I$  horaria).



Al acercar el polo S se crea cara S que lo repele ( $I$  horaria).

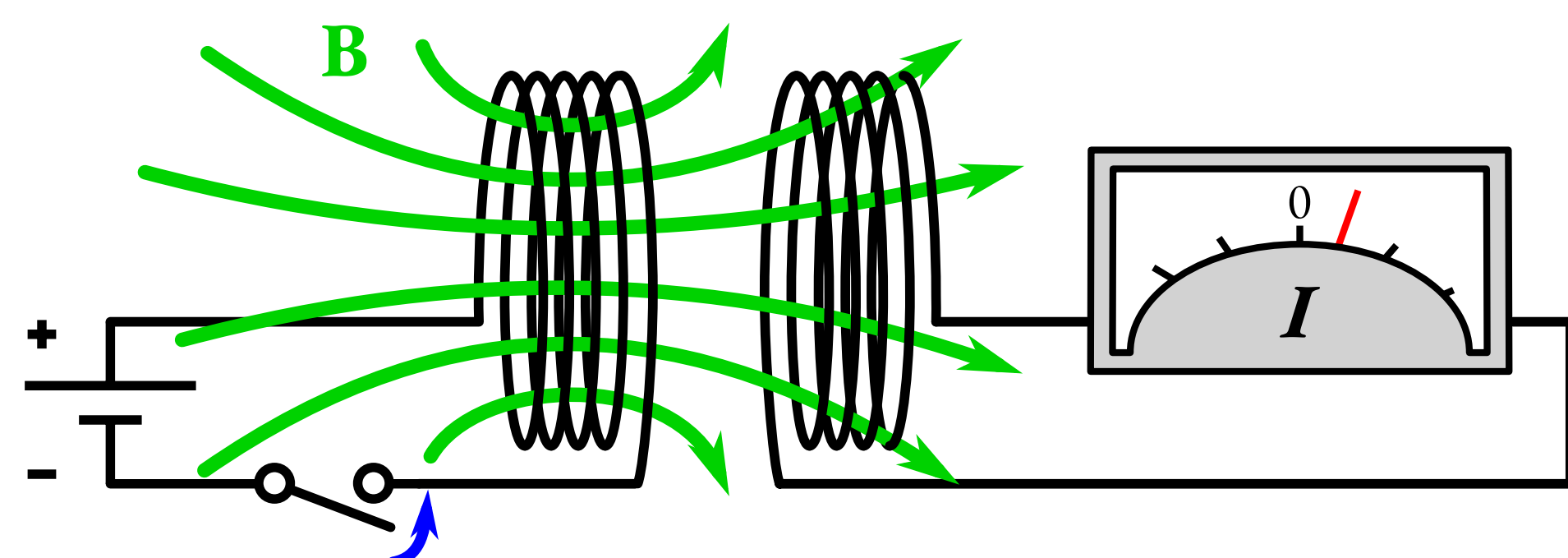
Al alejar el polo S se crea cara N que lo atrae ( $I$  antihoraria).

### 2ª experiencia

Emplea un montaje similar sustituyendo la espira por un solenoide. Se observa lo mismo pero de forma más acusada (resulta más fácil medir la  $I$  inducida en el solenoide).

### 3ª experiencia

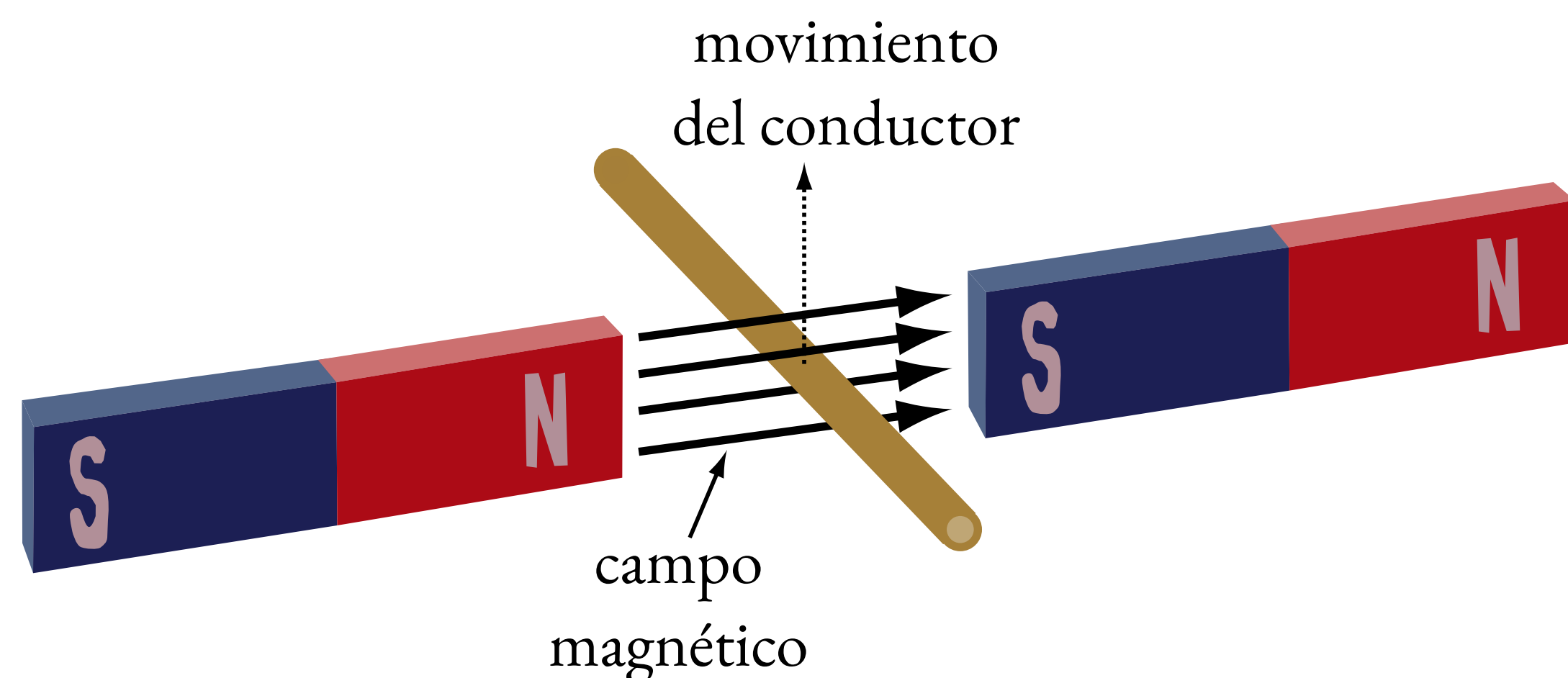
Se dispone de un solenoide conectado a una fuente con un interruptor. Paralelo a él hay otro solenoide conectado a un galvanómetro.



Al abrir y cerrar el interruptor del primer circuito se genera de forma instantánea una corriente inducida en el segundo circuito, la cual aparece únicamente en el instante en el que se abre o se cierra el interruptor; si permanece abierto o cerrado no se detecta corriente inducida. Adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Induction-by-a-changing-magnetic-field.svg>.

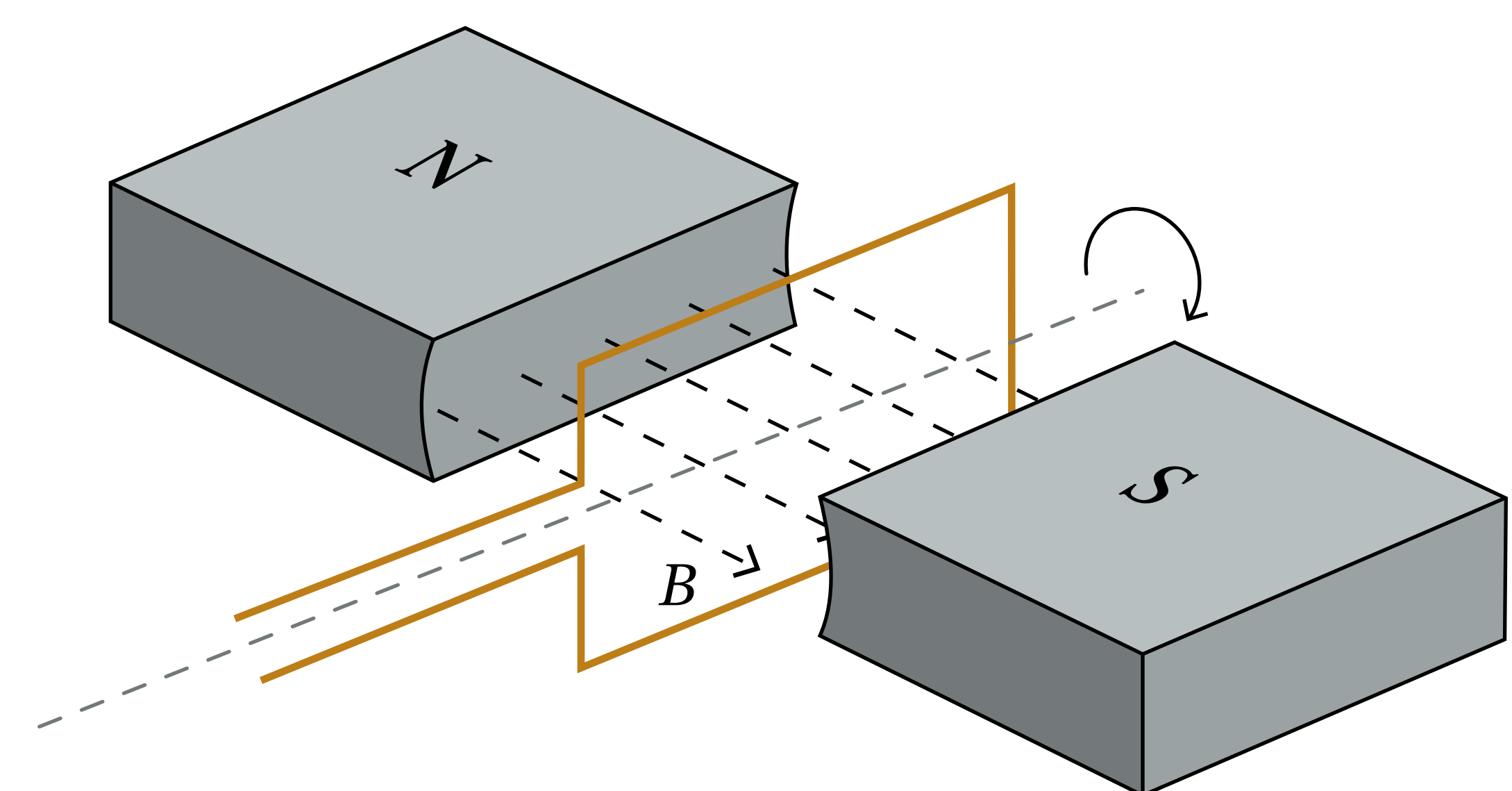
## Experiencia de Henry

HENRY descubrió que, cuando un conductor se movía perpendicularmente a un campo magnético, entre sus extremos aparecía una diferencia de potencial. Si el conductor forma parte de un circuito, en él aparece una corriente inducida.



Adaptada de [http://physics-schooluk.com/magnetism\\_motor\\_effect.html](http://physics-schooluk.com/magnetism_motor_effect.html).

Existen otras muchas experiencias de inducción electromagnética. Por ejemplo, para generar CORRIENTES ALTERNAS (aquellas cuyo sentido de circulación es variable), se utiliza:



Se hace girar una espira (o solenoide) que se encuentra en un campo magnético uniforme y se observa que, al girar, aparece una corriente inducida cuyo sentido varía cada media vuelta. Adaptada de <https://www.nagwa.com/en/explainers/357172034271/>.

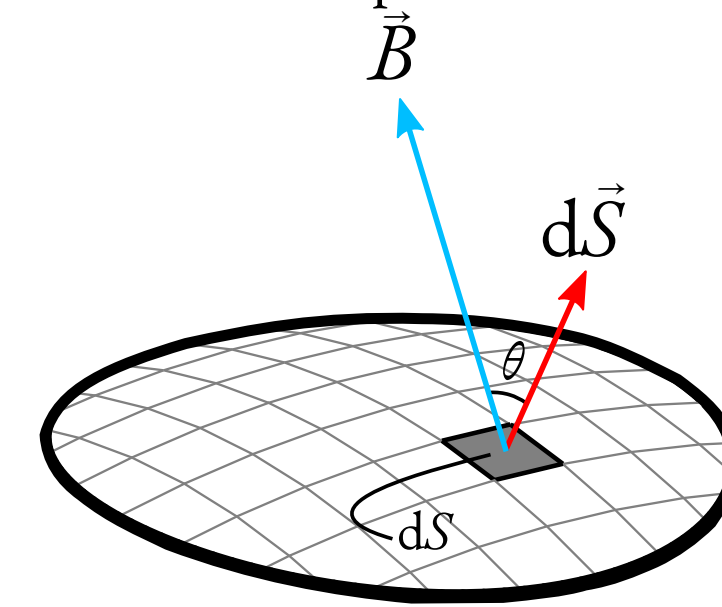
## Flujo magnético

Para poder explicar los fenómenos de inducción electromagnética, resulta imprescindible definir previamente el FLUJO MAGNÉTICO,  $\Phi$ , que atraviesa una superficie  $S$  de un circuito cerrado, relacionado con el número de líneas de campo que atraviesa la superficie. Viene dado por:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B dS \cos \theta,$$

$d\vec{S}$  es el vector superficie cuya dirección es perpendicular a la superficie y cuyo sentido es hacia afuera.  $\vec{B}$  es el campo magnético.  $\theta$  es el ángulo entre  $\vec{B}$  y  $d\vec{S}$ .

Su UNIDAD en el SI es el WEBER (Wb  $\equiv$  V s).



Adaptada de [https://gpg.geosci.xyz/content/electromagnetics/electromagnetic\\_basic\\_principles.html](https://gpg.geosci.xyz/content/electromagnetics/electromagnetic_basic_principles.html).

### Inducción electromagnética

La inducción se debe a una variación de flujo magnético, la cual puede producirse por tres causas diferentes:

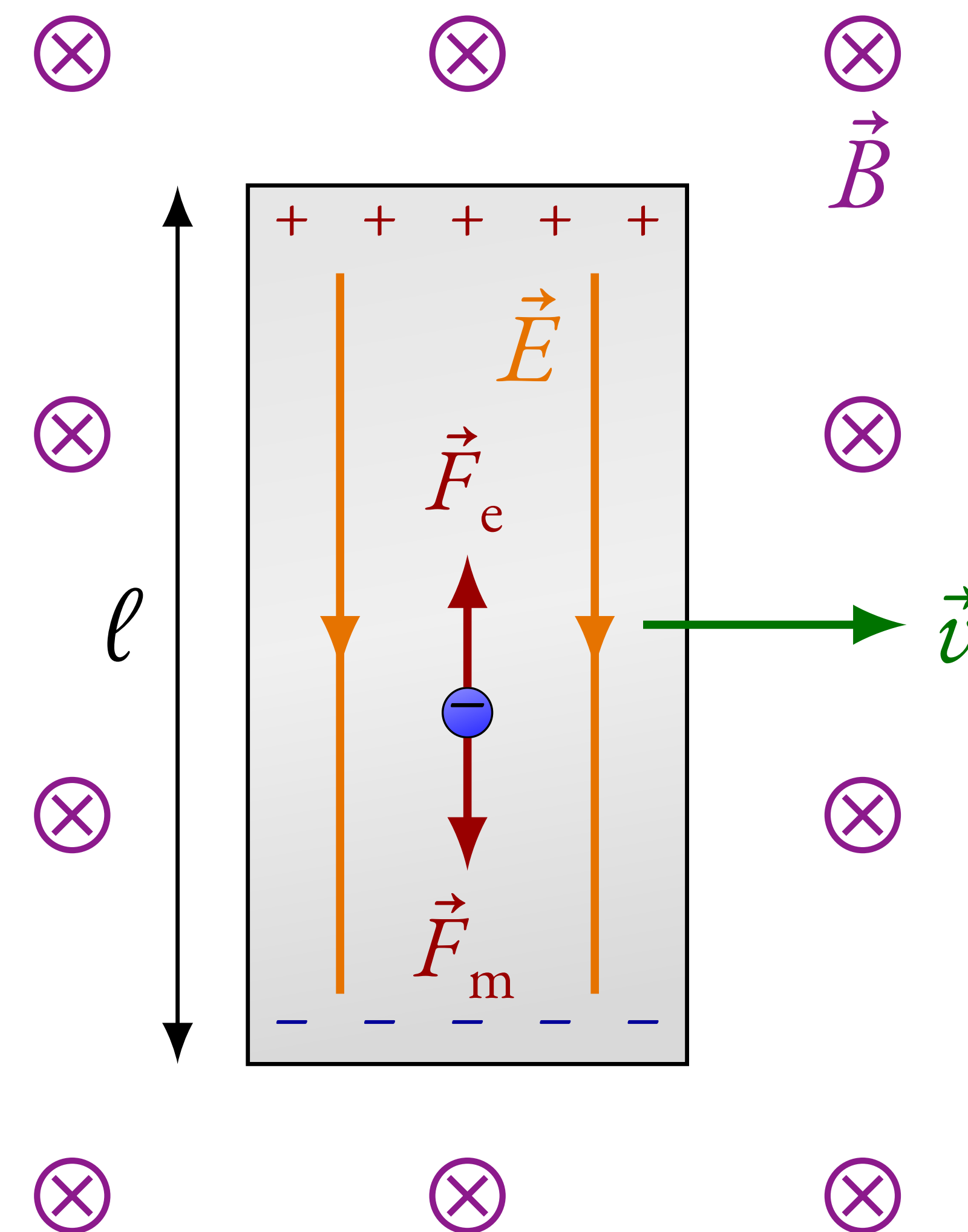
- Cambia  $\vec{B}$  con el tiempo: experiencias de Faraday.
- Cambia  $\theta$  con el tiempo: experiencia de la corriente alterna.
- Cambia  $S$  con el tiempo: experiencia de Henry.

Además, de las anteriores experiencias se deduce el sentido de la CORRIENTE INDUCIDA, ya que esta será tal que genere un campo magnético inducido que SE OPONE A LA VARIACIÓN DEL FLUJO que la produce:

- Si  $\Phi$  aumenta con el tiempo:  $I_{\text{ind}}$  da lugar a  $\vec{B}_{\text{ind}}$  que tiende a disminuir  $\Phi$ .
- Si  $\Phi$  disminuye con el tiempo:  $I_{\text{ind}}$  da lugar a  $\vec{B}_{\text{ind}}$  que tiende a aumentar  $\Phi$ .

## Fuerza electromotriz (fem) inducida

Para comprender bien por qué al variar el flujo magnético se produce una corriente inducida, consideraremos la EXPERIENCIA DE HENRY:



Adaptada de [https://tikz.net/magnetic\\_field\\_lenzs\\_law/](https://tikz.net/magnetic_field_lenzs_law/).

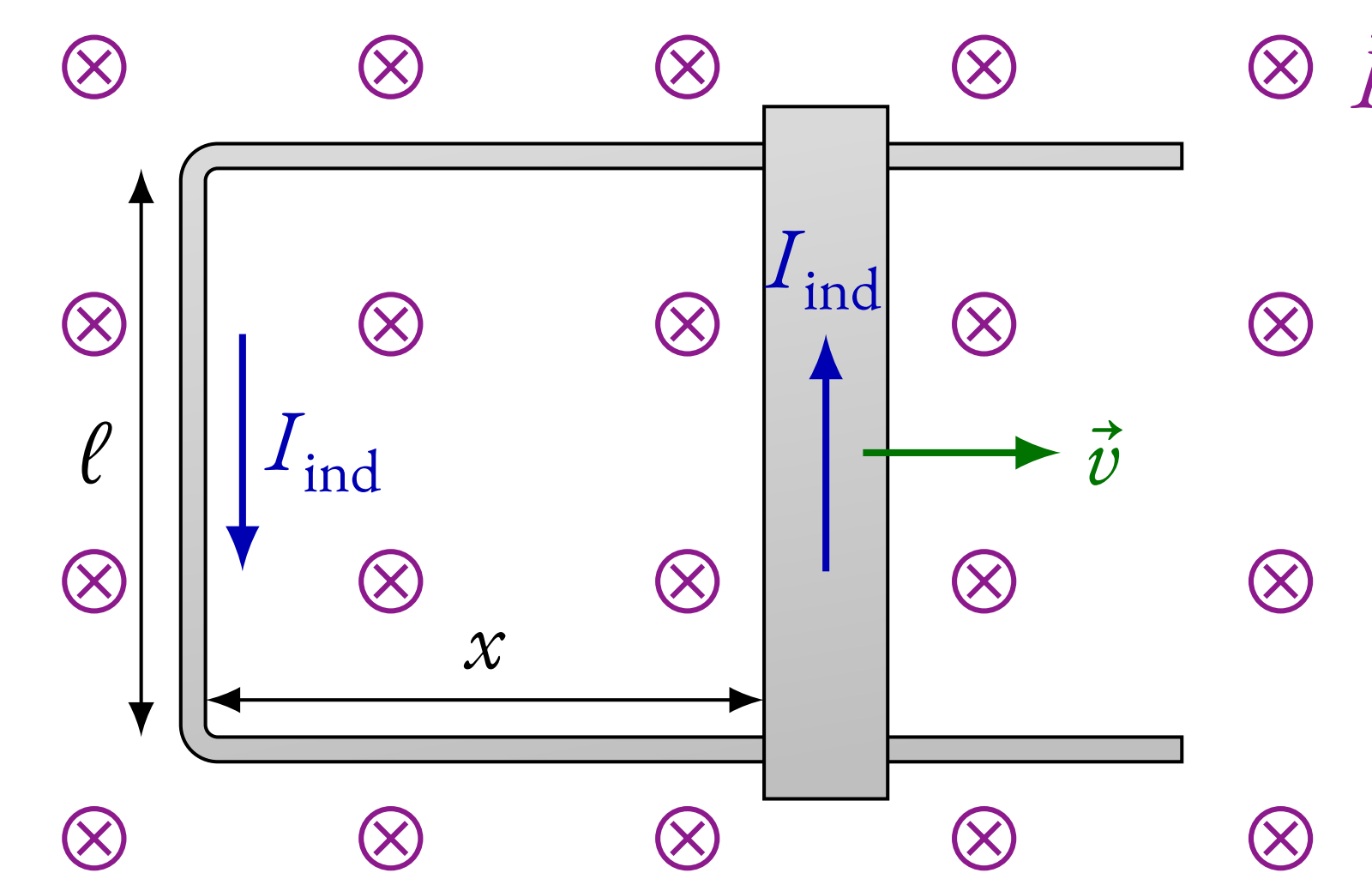
Supongamos que el conductor tiene una longitud  $\ell$  y se mueve con velocidad  $\vec{v}$  en una región en la que existe un  $\vec{B}$  uniforme ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ). Los electrones del conductor, debido a  $\vec{B}$ , se verán sometidos a una fuerza magnética  $\vec{F}_m$  dada por la LEY DE LORENTZ:

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

A medida que avanza el proceso, prácticamente instantáneo, se produce una separación de cargas (cationes y electrones) y aparece, por tanto, una diferencia de potencial  $\Delta V$  y un campo eléctrico  $\vec{E}$ . Así, los electrones también se verán sometidos a una fuerza eléctrica  $\vec{F}_e$  tal que:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

Se alcanza el equilibrio en el que  $F_e = F_m \Rightarrow E = vB$ . El campo eléctrico permanece constante siempre que el conductor se mueva con velocidad constante. Si conectamos el conductor a un circuito:



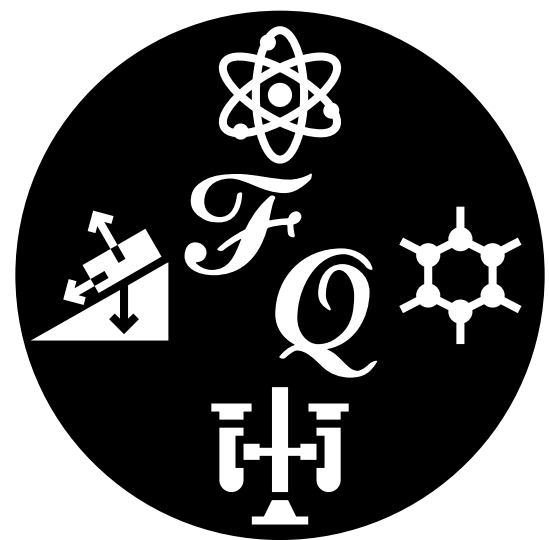
Por convenio, el sentido de  $I$  se elige como sentido de movimiento de cargas positivas. Adaptada de [https://tikz.net/magnetic\\_field\\_lenzs\\_law/](https://tikz.net/magnetic_field_lenzs_law/).

Para que la  $I_{\text{ind}}$  se mantenga es necesario mantener la  $\Delta V$  o equivalentemente la separación entre cargas. En nuestro caso la responsable es la velocidad del conductor, que hace que  $\vec{F}_m \neq \vec{0}$  y los electrones comiencen a moverse. Para que se mueva el conductor debemos aplicar un  $W_{\text{ext}}$ . Así, podemos definir la FUERZA ELECTROMOTRIZ FEM ( $\mathcal{E}$ ) como el trabajo realizado por unidad de carga para mantener la diferencia de potencial:

$$\mathcal{E} = \frac{W_{\text{ext}}}{q} \quad \text{Unidad en el SI: V (voltio)}$$

Normalmente, es proporcionada por un generador eléctrico.





# INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



## Ley de Faraday-Henry y ley de Lenz

En las diferentes experiencias hemos visto que aparece una corriente inducida cuando el flujo magnético varía con el tiempo, y que se debe a la fem. Además, depende también de la resistencia del conductor. Para calcular y relacionar estas magnitudes se tienen en cuenta las siguientes leyes:

### Ley de Faraday-Henry

“El valor de la fem inducida en un circuito es igual a la variación temporal del flujo magnético que lo atraviesa:”

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

### Ley de Lenz

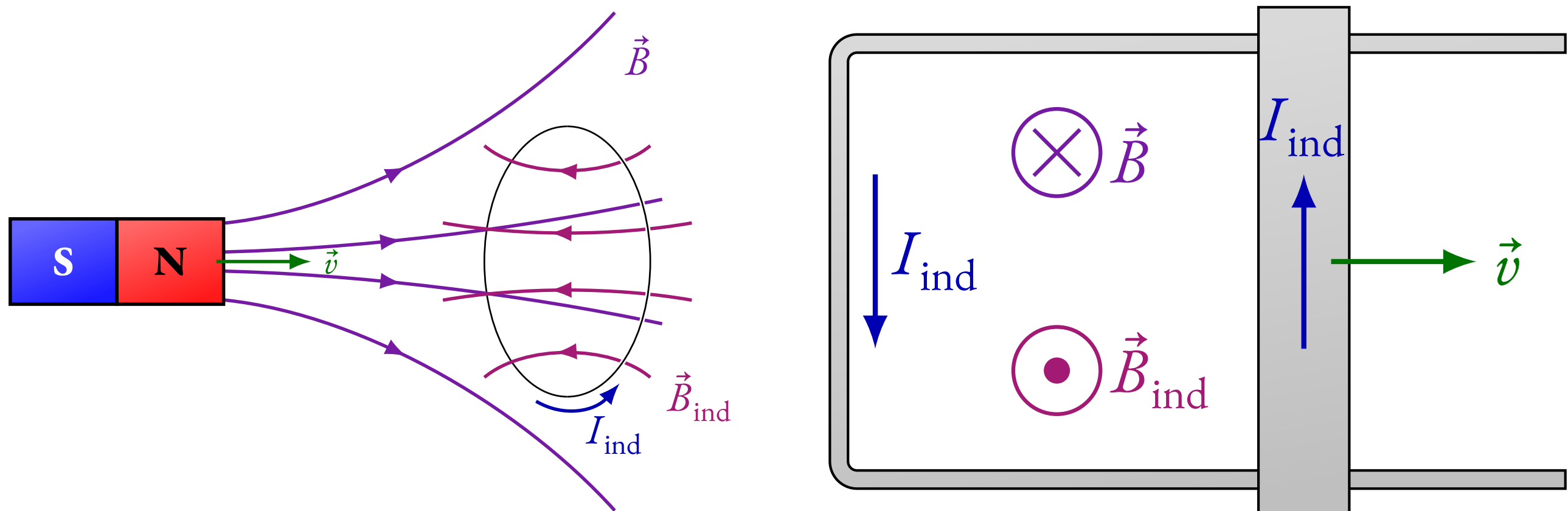
“El sentido de la corriente inducida es tal que se opone al efecto que la produce:”

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Si  $\Phi$  aumenta con  $t$ , la  $I_{\text{ind}}$  genera un  $\vec{B}_{\text{ind}}$  opuesto al  $\vec{B}_{\text{inicial}}$ .

Si  $\Phi$  disminuye con  $t$ , la  $I_{\text{ind}}$  genera un  $\vec{B}_{\text{ind}}$  igual al  $\vec{B}_{\text{inicial}}$ .

### Ejemplos



Adaptada de [https://tikz.net/magnetic\\_field\\_lenzs\\_law/](https://tikz.net/magnetic_field_lenzs_law/).

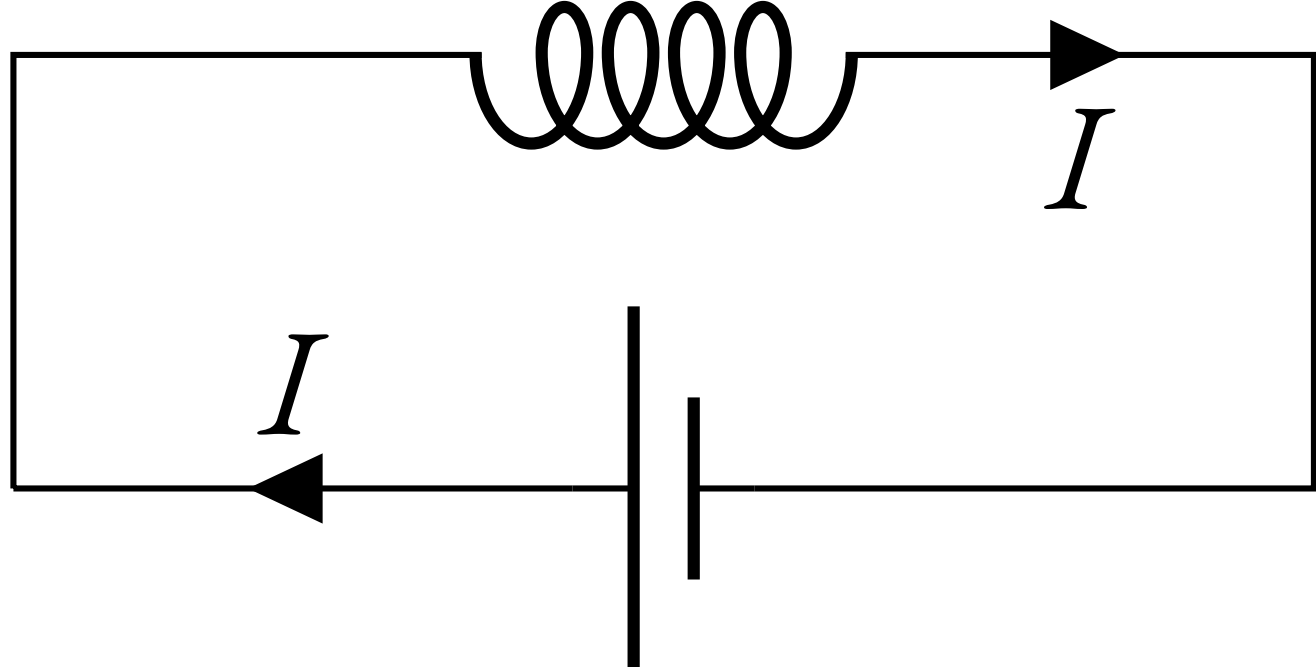
Una vez hemos calculado la fem inducida, podemos calcular la LEY DE OHM:

$$I_{\text{ind}} = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt},$$

donde  $R$  se mide en ohmios ( $\Omega$ ) e  $I_{\text{ind}}$  se mide en amperios (A) en el SI.

## Autoinducción

La AUTOINDUCCIÓN consiste en la inducción de una corriente sobre sí misma. Para que se produzca, es necesario que la corriente que recorre un circuito varíe con el tiempo. Consideremos un solenoide de longitud  $\ell$  y radio  $R$  formado por  $N$  espiras. El solenoide forma parte de un circuito en el que existe un generador de corriente continua y cuya resistencia es  $r$ .



El campo generado por el solenoide,  $\vec{B}$ , es paralelo a su eje y en su interior toma un valor constante:

$$B = \frac{\mu N I}{\ell}$$

Por lo tanto, el flujo que atraviesa el solenoide:

$$\Phi = BS \cos \theta = BS = \frac{\mu N I}{\ell} \cdot N \pi R^2 = \frac{\mu N^2 \pi R^2}{\ell} I = LI,$$

donde  $L = \mu N^2 \pi R^2 / \ell$  es el COEFICIENTE DE AUTOINDUCCIÓN, constante definida por las características del solenoide, cuyas UNIDADES en el SI son los HENRIOS (H). Solo aparecerá corriente inducida si  $I$  es variable (p. ej. corriente alterna). En ese caso aparecerá en el solenoide otra intensidad,  $I_{\text{autoind}}$ , que se opone a la variación del flujo. La fem autoinducida correspondiente,  $\mathcal{E}'$ , vendrá dada por:

$$\mathcal{E}' = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Así, la fem autoinducida depende de la rapidez con la que varía  $I$  y se opone a la variación:

$$I_{\text{autoind}} = \frac{\mathcal{E}'}{r} = -\frac{L}{r} \frac{dI}{dt} \quad (\text{ley de Ohm})$$

## Inducción mutua

Hasta ahora hemos visto que un circuito inductor genera una corriente inducida en otro circuito, el inducido. Pero no hemos considerado el efecto que este segundo circuito (inducido) tiene en el primero (inductor). A este fenómeno se le denomina INDUCCIÓN MUTUA. Consideremos dos solenoides:

*Solenoides 1*  $N_1$  espiras, longitud  $\ell_1$ , unido a un circuito por el que circula  $I_1$  y tiene una resistencia  $r_1$ .

*Solenoides 2*  $N_2$  espiras, longitud  $\ell_2$ , unido a un circuito en el que hay un galvanómetro que permite medir el paso de la corriente  $I_2$ .

Supongamos que la superficie de las espiras es la misma en ambos (S) y  $\ell_1 = \ell_2 = \ell$ .

Cuando aparece  $I_1$  en el solenoide 1 se genera  $B_1$  tal que:

$$B_1 = \frac{\mu N_1 I_1}{\ell}$$

Este campo atraviesa las espiras del solenoide 2, generando un flujo magnético  $\Phi_2$  tal que:

$$\Phi_2 = B_1 N_2 S = \frac{\mu N_1 N_2 S}{\ell} I_1 = M_{12} I_1,$$

donde  $M_{12} = \mu N_1 N_2 S / \ell$  es el COEFICIENTE DE INDUCCIÓN MUTUA que ejerce 1 sobre 2.

Si  $I_1$  varía con el tiempo,  $\Phi_2$  es variable y aparece una corriente inducida y fem:

$$\mathcal{E}_2 = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}$$

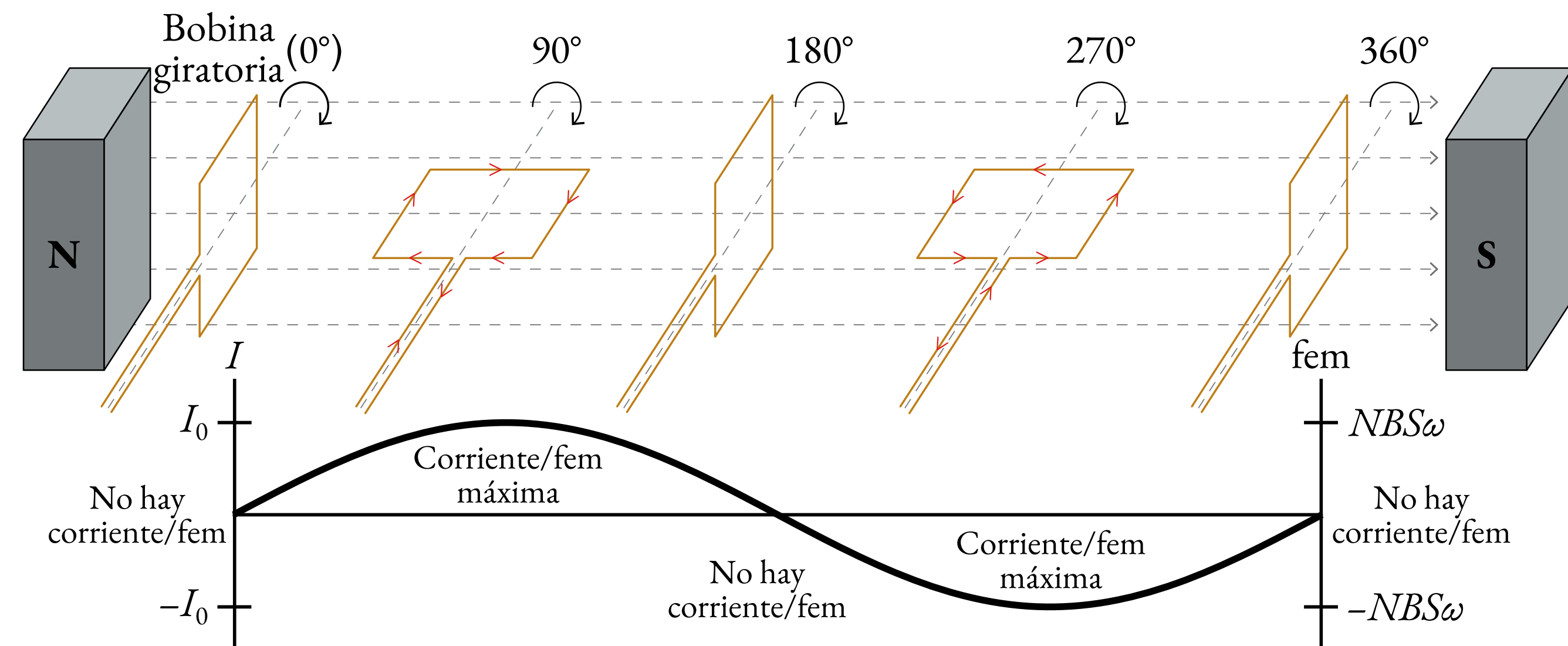
El fenómeno también se produce a la inversa:

$$\mathcal{E}_1 = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}$$

Es fácil demostrar que  $M_{12} = M_{21} = M = \mu N_1 N_2 S / \ell$ .

## Generación de corrientes alternas

Se entiende por CORRIENTE ALTERNA aquella cuyo SENTIDO de circulación es VARIABLE, distinguiéndose así de la corriente continua. La GENERACIÓN de CORRIENTES ALTERNAS se basa en la INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA, específicamente en la VARIACIÓN de un FLUJO MAGNÉTICO.



GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA, basado en la variación del ángulo formado entre el campo magnético y la superficie de una bobina, que gira en su seno con velocidad angular constante. Adaptada de <https://www.nagwa.com/en/explainers/357172034271/>.

Suponiendo una espira que gira con velocidad angular  $\omega$ , el flujo magnético que la atraviesa viene dado por:

$$\Phi = BS \cos \theta = BS \cos \omega t,$$

por lo que la fem inducida viene dada por la ley de Faraday-Henry:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

En el caso de una bobina de  $N$  espiras, la fem puede expresarse como:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad \text{con } \mathcal{E}_0 = NBS\omega$$

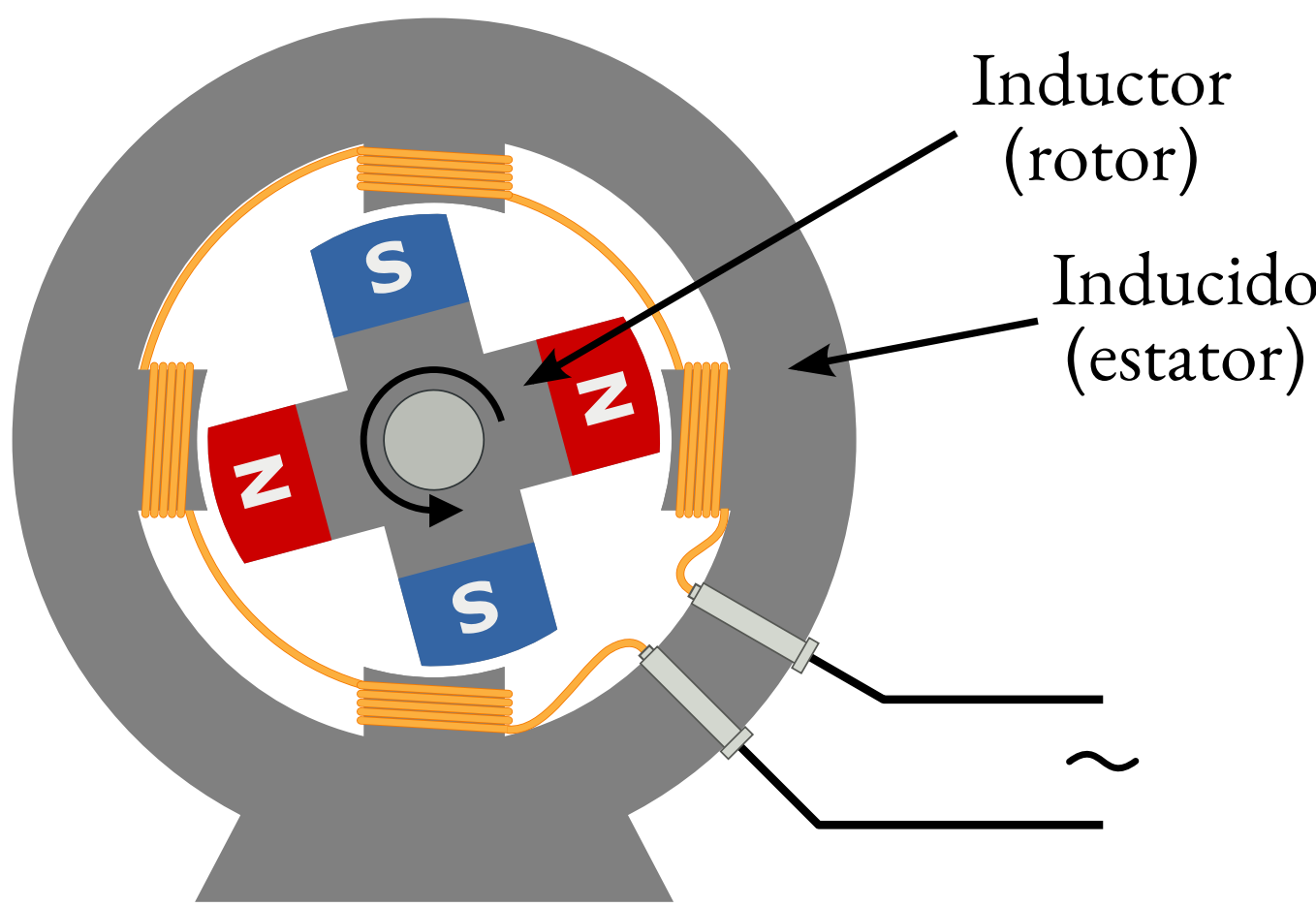
Si consideramos que el generador descrito está integrado en un circuito sencillo que consta solamente de una resistencia  $r$ , aplicando la ley de Ohm puede obtenerse la intensidad inducida, que varía sinusoidalmente:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{r} = I_0 \sin \omega t \quad \text{con } I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{r}$$

## Aplicaciones de la inducción electromagnética

### Generadores de corriente alterna (alternadores)

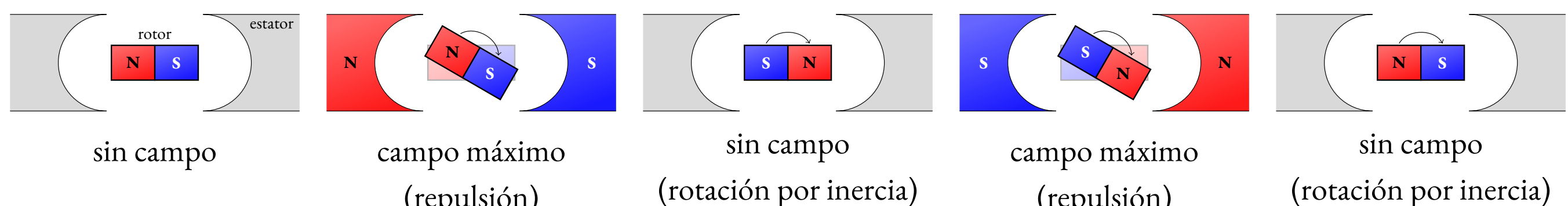
Un GENERADOR ELÉCTRICO es un dispositivo que TRANSFORMA la ENERGÍA MECÁNICA en ENERGÍA ELÉCTRICA. Los generadores más sencillos están constituidos por un bobinado que gira en el seno de un campo magnético uniforme, aunque esta configuración no es útil cuando se requieren potencias elevadas. Es por eso que los ALTERNADORES actuales se construyen de forma que la parte que gira es el electroimán (rotor) y la parte que permanece fija es el bobinado (estator).



ALTERNADOR. El estator es una pieza de hierro fija con varios salientes que son polos. Es en el estator donde se arrollan los bobinados, uno en cada polo, de forma que cada bobinado tenga sentido opuesto al adyacente. En el centro del estator se ubica el rotor, provisto de tantos polos como el estator, que gira con una velocidad angular determinada. Cuanto mayor sea el número de polos del rotor y el estator, mayor será la frecuencia de la corriente alterna inducida, puesto que en una vuelta del rotor se completarán más ciclos completos. Adaptada de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alternador.svg>.

### Motores

Los MOTORES de corriente alterna TRANSFORMAN ENERGÍA ELÉCTRICA en ENERGÍA MECÁNICA, justo al contrario de lo que sucede en los alternadores. En la siguiente figura se esquematiza su funcionamiento:

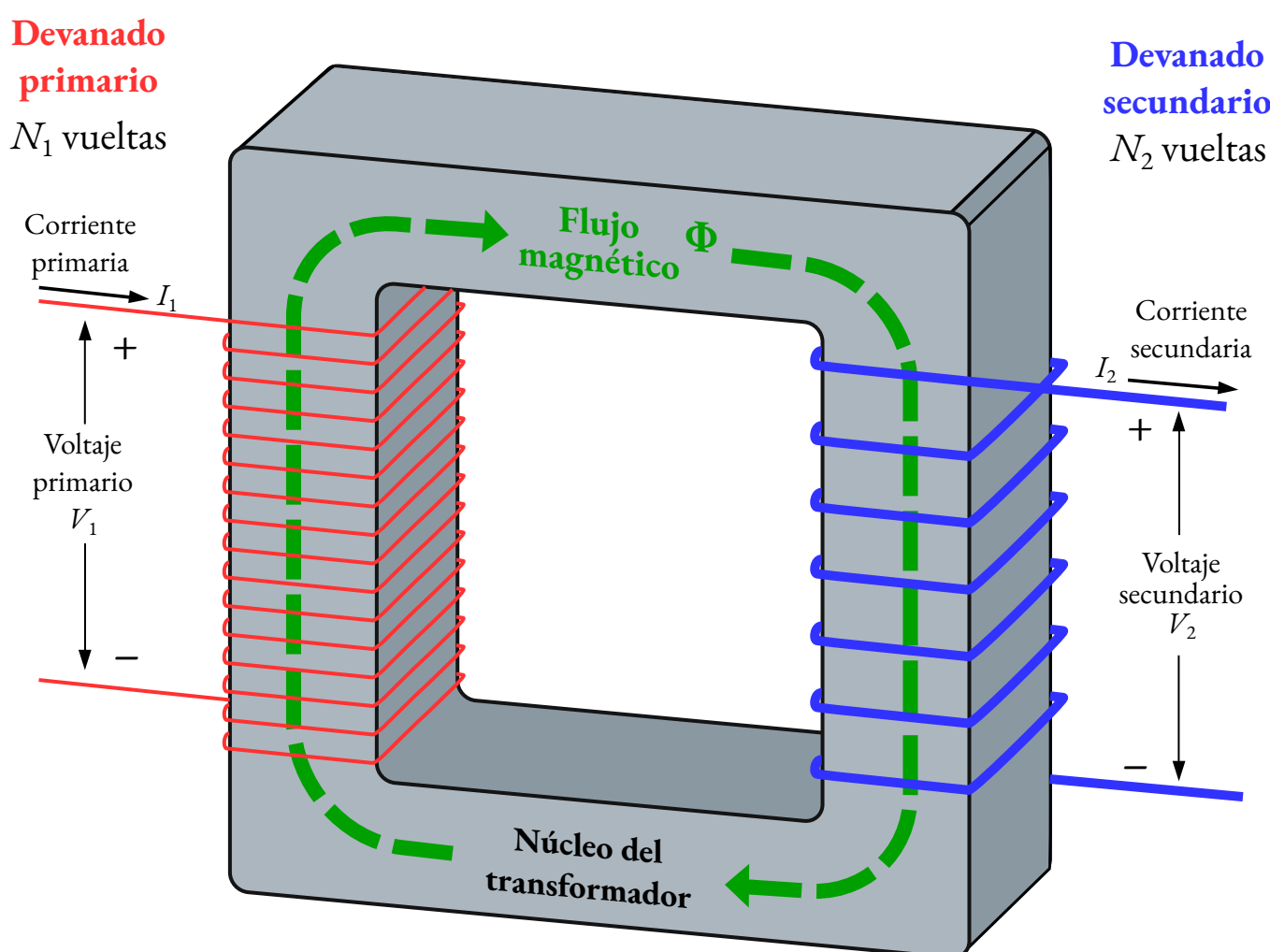


El estator está provisto de bobinado arrollado de forma que al paso de corriente da lugar a dos polos magnéticos. En el interior se sitúa el rotor, que es un imán con sus polos N y S. El bobinado se alimenta con corriente alterna. Cuando el valor de la corriente aumenta, el imán sufre la repulsión provocada por polos iguales enfrentados, y gira hasta que se orienta según el campo generado por los polos del estator. Justo antes de que se invierta el sentido de la corriente alterna, no hay campo, y el rotor se desplaza debido a la inercia. Una vez se invierte el sentido de la corriente, también lo hacen los polos del estator y el campo que generan. Por lo tanto, el rotor, debido a la repulsión continúa girando hasta orientarse de nuevo, y así sucesivamente.

### Transformadores

La importancia de las corrientes alternas reside en la eficiencia con la que permiten TRANSPORTAR la ENERGÍA ELÉCTRICA. Entre un generador eléctrico y el punto de consumo de la energía eléctrica se producen, de forma ineludible, PÉRDIDAS debidas al EFECTO JOULE, que tienen lugar en las líneas de transporte. Para reducir estas pérdidas deben emplearse materiales con la mínima resistencia posible. Además, cuanto menor sea la intensidad de corriente, o equivalentemente mayor sea el voltaje, menores serán las pérdidas. Esto último hace que la corriente alterna pueda transportarse de forma mucho más eficiente que la continua, puesto que puede incrementarse el voltaje en la salida del generador, transportarse por las líneas de alta tensión y reducirlo de nuevo a su valor de consumo (220 V en España) antes de llegar al punto de consumo.

Esto se consigue con la ayuda de TRANSFORMADORES, dispositivos capaces de TRANSMITIR la ENERGÍA ELÉCTRICA de un circuito de corriente alterna a otro, sin modificar su frecuencia. Esta transmisión va acompañada de un cambio de voltaje de forma que cuando el transformador devuelve una tensión más alta, se denomina elevador, y cuando devuelve una tensión más baja, se dice que es un reductor.



TRANSFORMADOR reductor. Consta de un núcleo de hierro (Fe) en torno al cual se disponen dos bobinados de hilo de cobre. La corriente alterna llega a uno de los bobinados, denominado primario, dando lugar a un flujo magnético variable en el núcleo de Fe, que atraviesa el segundo bobinado, denominado secundario. Según Faraday, se generará en el secundario una fem inducida que se opone a la variación del flujo. Si el arrollamiento primario tiene más espiras que el secundario, el transformador es un reductor de tensión. En caso contrario, elevador de tensión. Adaptada de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformer3d\\_col3\\_es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformer3d_col3_es.svg).

Así, la energía eléctrica se transfiere del primario al secundario, cumpliéndose:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$