



UNIVERSIDADE
DE VIGO

TEORÍA GENERAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Principios fundamentales

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Universidad de Vigo

Las tecnologías que
cambiarán nuestro mundo,
empezaron a desarrollarse
hace más de un millón de
años.



PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO

**¿Cómo funcionan? ¿En qué
principios se basan las
máquinas eléctricas?**

PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO

¿Cómo funcionan? ¿En qué principios se basan las máquinas eléctricas?

La respuesta es mucho más sencilla de lo que parece: estos dispositivos funcionan gracias a **la inducción electromagnética**. En los fenómenos de inducción electromagnética se producen fuerzas que, en último extremo son las responsables de los movimientos producidos en este tipo de máquinas.

Por ello se hace necesario realizar un repaso previo a todos los conceptos de los campos electromagnéticos y sus efectos.

PRINCIPIOS ELEMENTALES

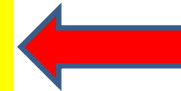


Hans Christian Ørsted
(1777-1851)



“Todo conductor por el que circula una corriente eléctrica origina en sus proximidades un campo magnético”

“en todo conductor que se mueva en el seno de un campo magnético se induce una tensión...”



Michael Faraday
(1791-1867)



Pierre Simon Laplace
(1749-1827)



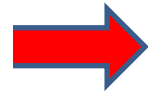
“Todo conductor inmerso en un campo magnético, por el que circula una corriente eléctrica, experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento...”

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

ECUACION DE MAXWELL



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



Maxwell demostró que la electricidad, el magnetismo y la luz, son manifestaciones del mismo fenómeno, denominado campo electromagnético y formuló la teoría electromagnética clásica, a través de las llamadas Ecuaciones de Maxwell.

La ley fundamental que determina el funcionamiento de un circuito magnético viene dada por la **ecuación de Maxwell:**

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial T}$$

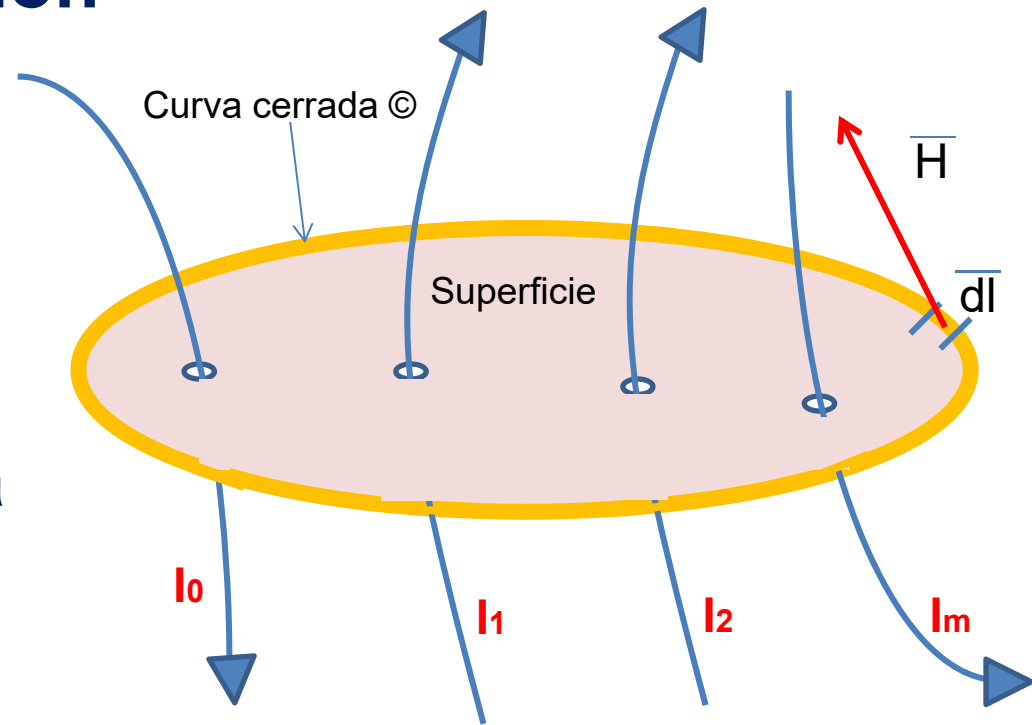
- $\vec{H}$ $\Rightarrow$ Intensidad del campo magnético
- $\vec{j}$ $\Rightarrow$ Densidad de corriente
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial T}$ $\Rightarrow$ Efecto producido por las corrientes de desplazamiento (**sólo alta frecuencia**)

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Si se integra la ecuación de Maxwell:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial T}$$

sobre una superficie determinada por una curva cerrada:



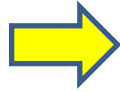
$$\iint_S \text{rot}(\vec{H}) \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Teorema de Stokes

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

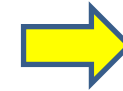
$$\iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS}$$



Representa a la corriente total que atraviesa a la superficie:

15/09/2021

En las máquinas eléctricas la corriente circulará por los conductores que forman los bobinados, por tanto, la integral de superficie se podrá sustituir por un sumatorio:



$$\iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS} = \sum_j I_j$$

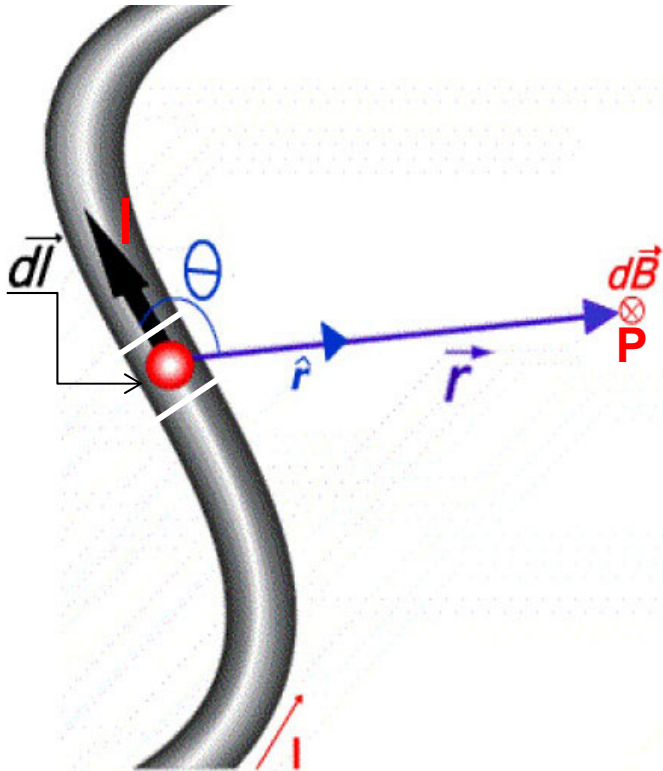
$$\oint_C \vec{H} \cdot \vec{dl} = \sum_j I_j$$



Teorema de Ampere

“La circulación de la intensidad de campo magnético a lo largo de una línea cerrada es igual a la corriente concatenada por dicha línea”

Ley de Biot y Savart



Conductor por el que circula una corriente I



Jean Baptiste Biot
(1774-1862)

+



Félix Savart
(1791-1841)

Los científicos franceses Jean-Baptiste Biot y Félix Savart descubrieron la relación entre una corriente y el campo magnético que esta produce.

La **Ley de Biot-Savart** para el campo creado por un elemento $d\vec{l}$ de un conductor que transporta una corriente I en un punto P es:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

15/09/2024

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, $\hat{r}$ es un vector unitario y r es la distancia del punto P al elemento de conductor $d\vec{l}$.

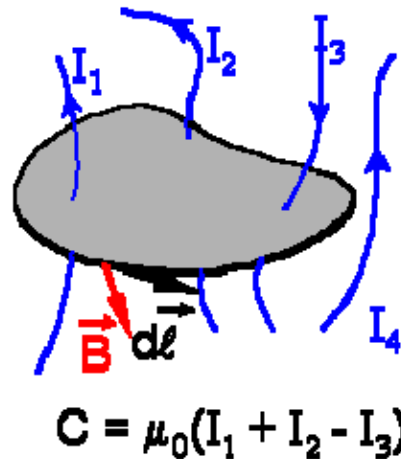
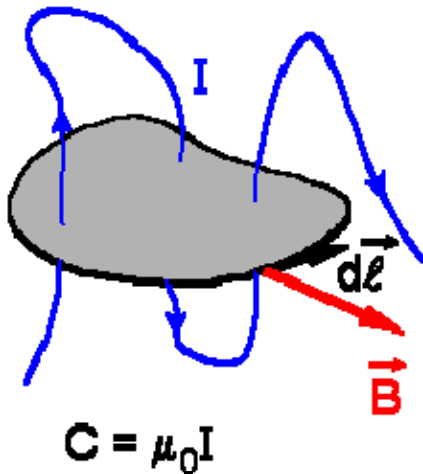
TEOREMA DE AMPERE



André-Marie Ampère
(1775-1836)



De las leyes de Ampère, la más conocida es la de electrodinámica. Esta describe las fuerzas que dos conductores paralelos por los que circula corriente eléctrica ejercen uno sobre otro. Si el sentido de la corriente es el mismo en los dos conductores, estos se atraen; si la corriente circula en sentidos opuestos, los conductores se repelen. Describe igualmente la relación que existe entre la intensidad de corriente y la del campo magnético correspondiente

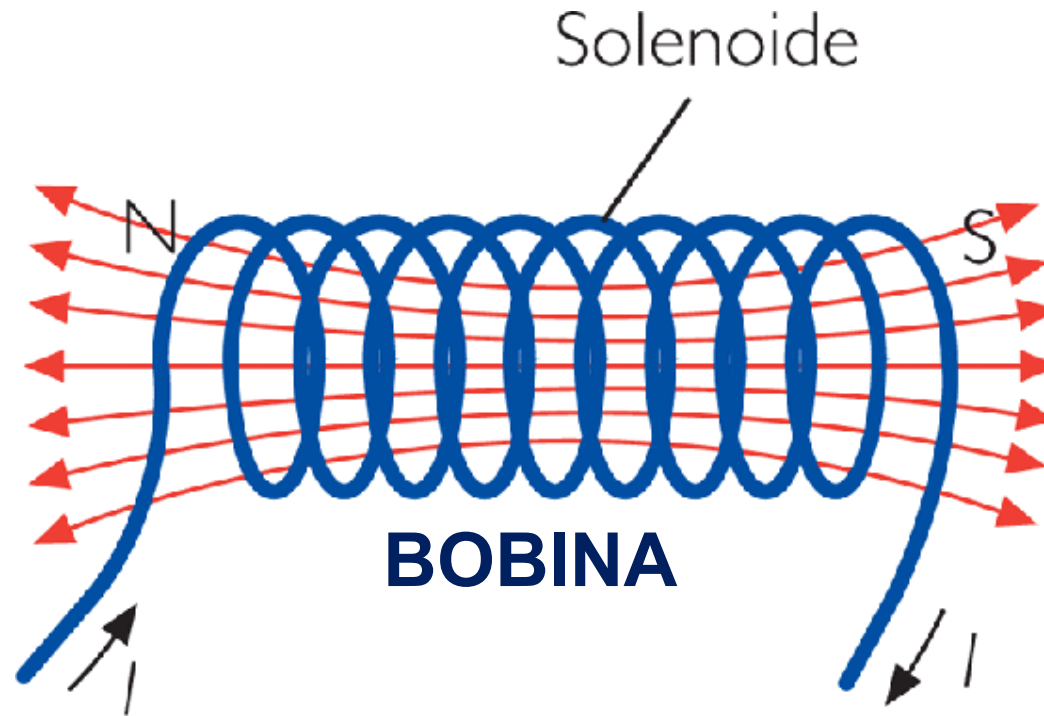


La circulación del vector campo magnético a lo largo de una línea cerrada que rodea a un conductor por el que circula una corriente de intensidad I , es igual al producto de la constante μ_0 por la intensidad que penetra en el área limitada por la curva.

$\mu_0 \Rightarrow$ Permeabilidad magnética del vacío $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_j I_j$$

CAMPO CREADO POR UNA BOBINA



En el caso de que la misma corriente concatene “N” veces a la curva, como ocurre en una bobina:

$$\oint_c H dl = \sum_j I_j$$



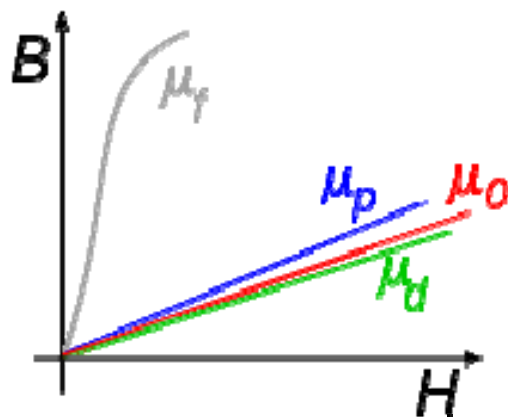
TEOREMA DE AMPERE



$$\oint_c H dl = N \cdot I$$

INDUCCIÓN MAGNÉTICA

La inducción magnética, también conocida como densidad de flujo de un campo magnético de intensidad H , se define como el siguiente vector:



$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H}$$

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío

μ_r = Permeabilidad relativa del material

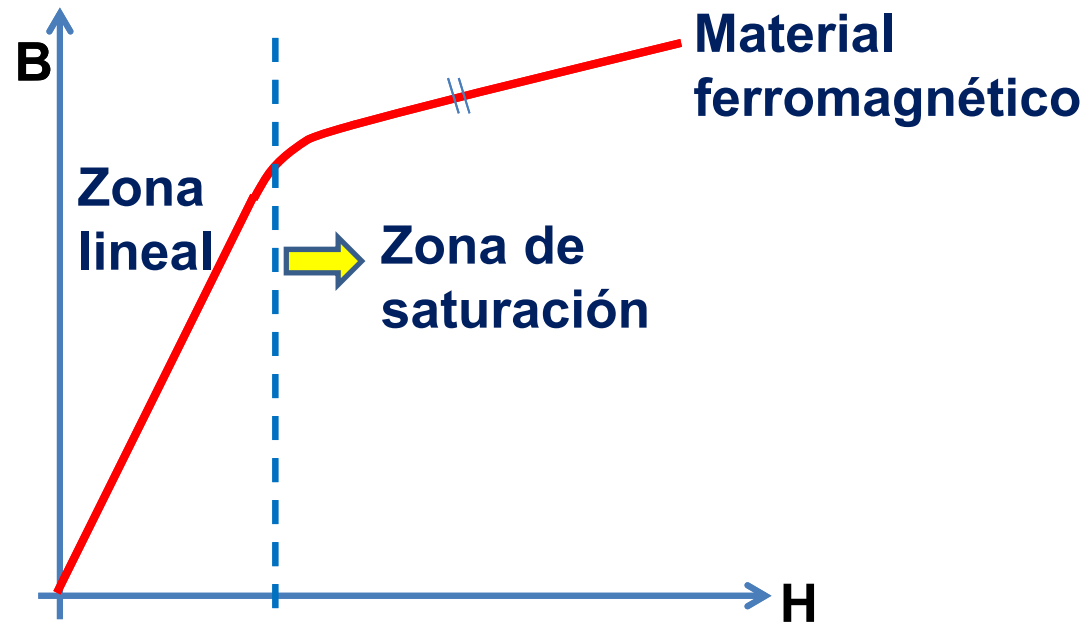
μ_a = Permeabilidad magnética absoluta

Comparación simple de permeabilidades para: ferromagnetos (μ_f), paramagnetos (μ_p), diamagnetos (μ_d) y el vacío (μ_0).

La permeabilidad relativa se suele tomar con referencia al aire. En el circuito magnético de una máquina eléctrica moderna μ_r puede alcanzar valores próximos a 100.000 H/m.

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad [\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})]$$

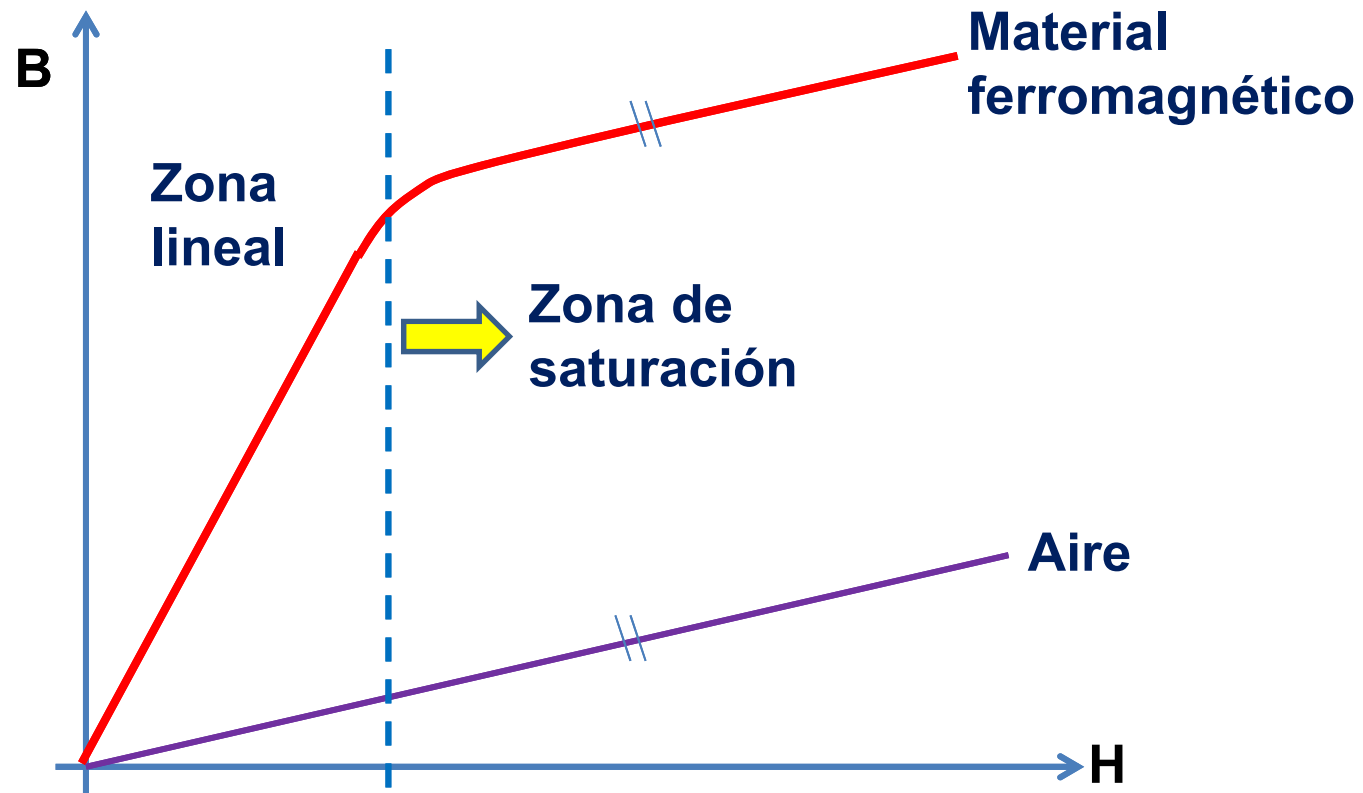
INDUCCIÓN MAGNÉTICA



Propiedades de materiales ferromagnéticos

- > Inducción magnética alta al utilizar un campo magnético
- Concentran las líneas de campo magnético fácilmente y acumulan una densidad de flujo magnético elevada
- > Delimitan y dirigen los campos magnéticos en trayectorias definidas
- Ayudan a que las máquinas eléctricas tengan un volumen razonable y sean menos costosas.

INDUCCIÓN MAGNÉTICA



El material ferromagnético, una vez que alcanza la saturación, tiene un comportamiento idéntico al del aire, no permitiendo que la densidad de flujo siga aumentando significativamente a pesar de que la intensidad del campo si lo haga.

FLUJO MAGNÉTICO

El flujo magnético se puede definir como el número de líneas de campo magnético que atraviesan una determinada superficie



$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

Si los vectores campo y superficie son paralelos



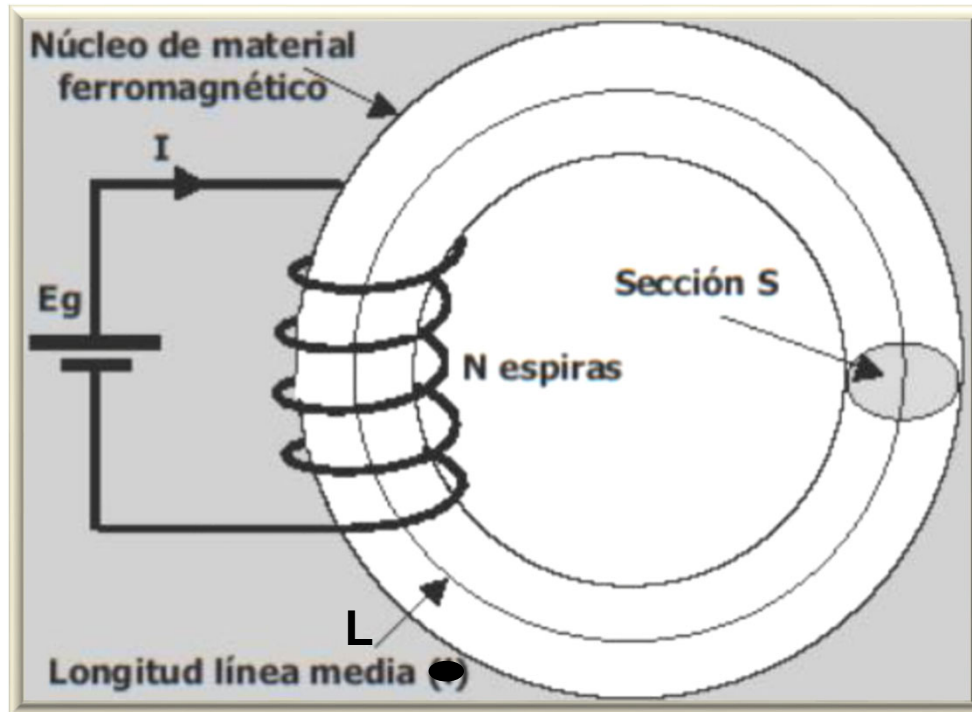
$$\Phi = B \cdot S$$

Para calcular el flujo en un circuito magnético es necesario aplicar el teorema de Ampere



$$\oint_C \vec{H} \cdot \vec{dl} = N \cdot I$$

FUERZA MAGNETOMOTRIZ



Circuito magnético elemental

➡ Se supone la permeabilidad del material magnético infinita

➡ Como la sección (S) es pequeña en comparación con la longitud (L) se supone que la intensidad de campo (H) es constante en toda ella.



$$H = Cte$$

Fuerza magnetomotriz



$$F = H L = N I$$



RELUCTANCIA MAGNETICA

La fmm representa a la suma de corrientes que crean el campo magnético



$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$



Como el vector densidad de flujo y superficie son paralelos



$$\Phi = B \cdot S$$

Como se cumple: $\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H}$

Sustituyendo: 

$$\Phi = \frac{N \cdot I}{\frac{L}{\mu_a \cdot S}}$$

 **Reluctancia (R)** 

$$R = \frac{L}{\mu_a \cdot S}$$

PARALELISMO CE y CM

Ley de Hopkinson

$$F = \Phi \cdot R$$

F = Fuerza magnetomotriz
 Φ = Flujo magnético
 R = Reluctancia

Ley de Ohm

$$V = I \cdot R$$

V = Diferencia de potencial
 I = Corriente Eléctrica
 R = Resistencia

Paralelismo entre circuitos eléctricos y circuitos magnéticos

Unidades de las magnitudes electromagnéticas

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO H : Amperios*Vuelta

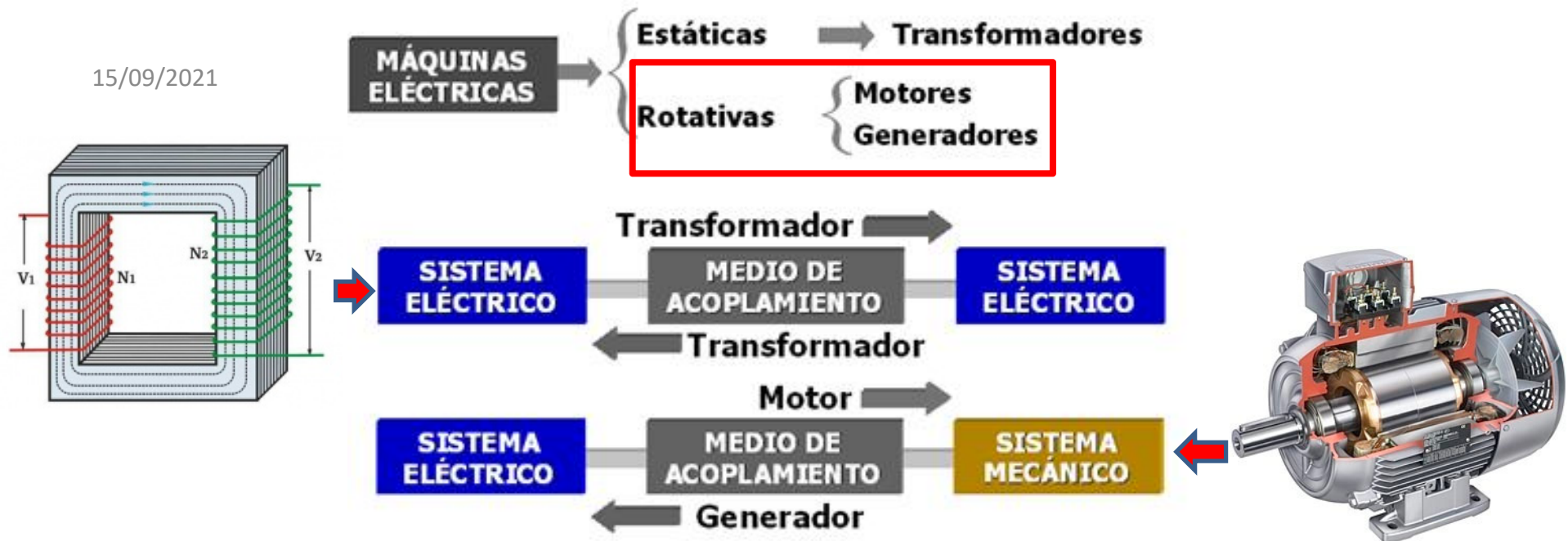
INDUCCIÓN MAGNÉTICA B : Tesla (T)

FLUJO MAGNÉTICO Φ : Weber (Wb) 1Wb=Tesla/m²

FUERZA MAGNETOMOTRIZ F : Amperios*Vuelta

FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA e : Voltio (V)

MÁQUINAS ELÉCTRICAS

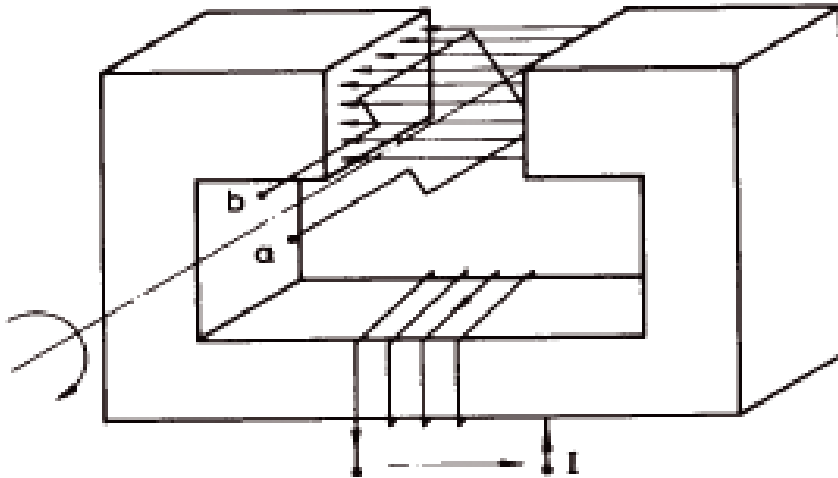


► Las máquinas eléctricas se dividen en **estáticas y rotativas**; las estáticas son los transformadores. Las rotativas como su nombre indica, disponen de una parte móvil (**rotor**) susceptible de girar alrededor de un eje.

► Se puede definir una **máquina eléctrica rotativa** como un convertidor electromecánico de energía, que puede realizar una transformación de **energía eléctrica a energía mecánica (motores)** o **de energía mecánica a energía eléctrica (generadores)**, siempre y cuando medie en esta transformación un campo magnético.

MÁQUINA ELÉCTRICA ELEMENTAL

15/09/2021



➡ Devanado inductor y devanado inducido.

➡ Campo magnético de excitación.

➡ Campo magnético inducido.

➡ Estator, entrehierro y rotor.

➡ Dos circuitos eléctricos independientes.

➡ Un circuito magnético.

➡ Devanado fijo y devanado móvil.

➡ Campo magnético.

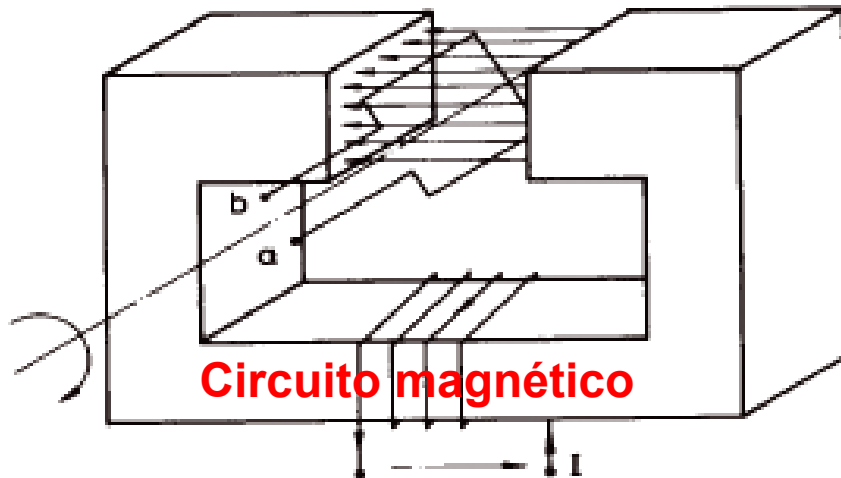
Salvo las maquinas con imanes permanentes, las cuales carecen de devanado inductor, el resto de las maquinas eléctricas disponen de, al menos, dos devanados: el **inductor** y el **inducido**.

➡ El **circuito magnético** sirve para canalizar el flujo magnético y de enlace entre los dos circuitos eléctricos.

➡ El campo magnético es el responsable de la transformación de energía.

MÁQUINA ELÉCTRICA ELEMENTAL

Circuito magnético



► El **circuito magnético** sirve de enlace entre los dos circuitos eléctricos y está conformado por algún material ferromagnético.

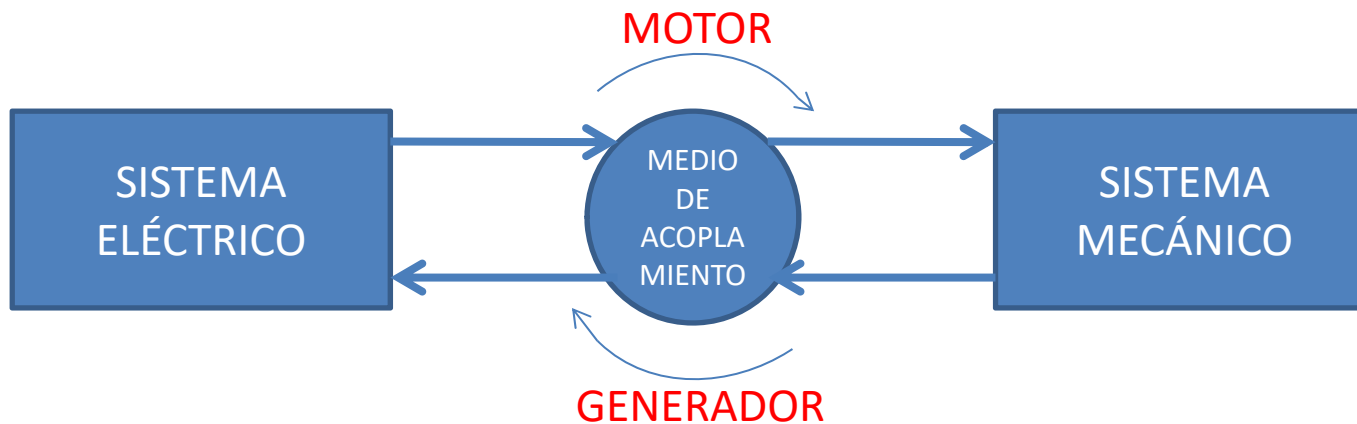
► Los **materiales ferromagnéticos**, han evolucionado mucho con el paso del tiempo lo que implica más eficiencia, reducción de volúmenes y costo, en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas rotativas.

15/09/2021

► Los **materiales ferromagnéticos**, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, así como un % de Si, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución del **circuito magnético** de los transformadores y máquinas eléctricas rotativas.

20

MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS



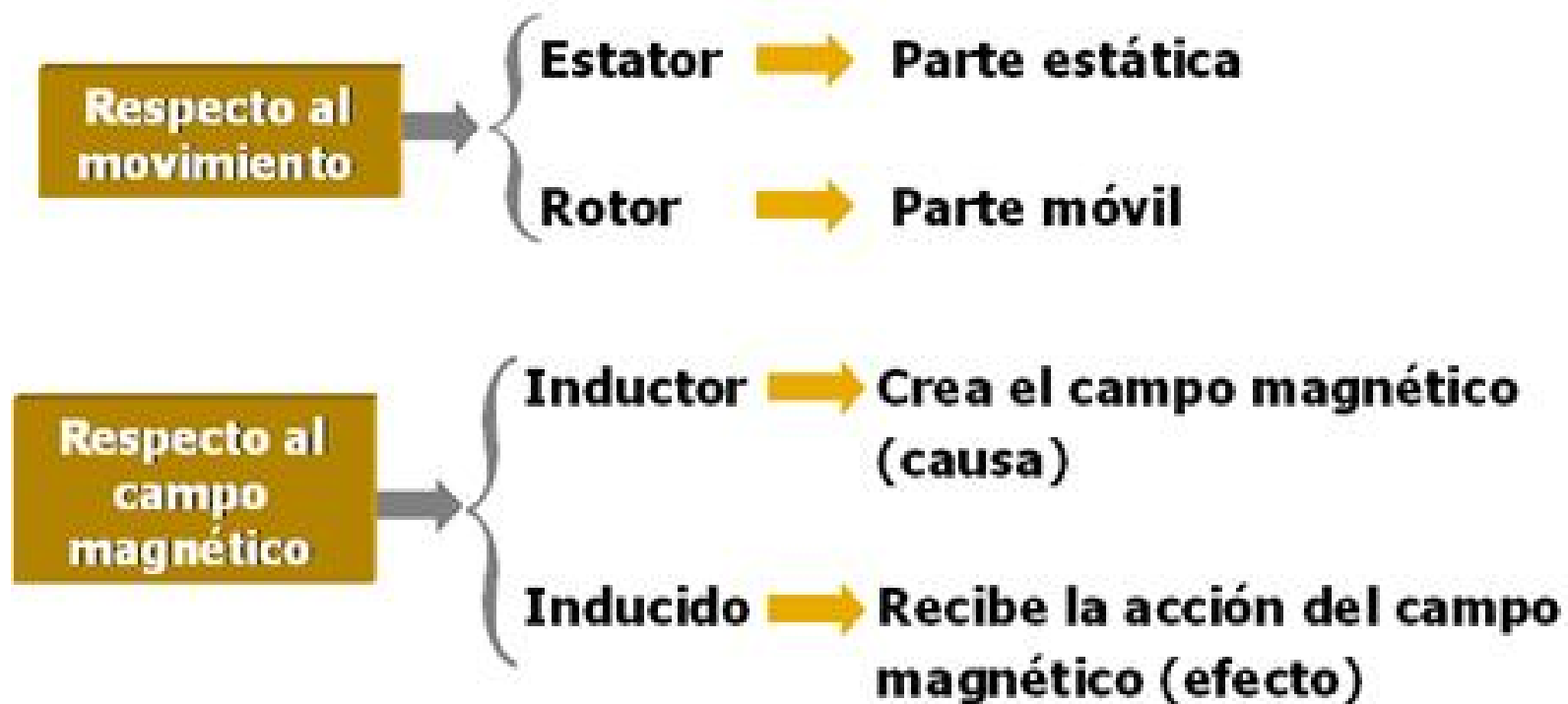
PARTE QUE GIRA  ROTOR
PARTE FIJA  ESTATOR

Las máquinas eléctricas rotativas son **REVERSIBLES**, es decir, pueden funcionar como **MOTOR** o como **GENERADOR**

Un motor, produce movimiento del rotor a partir de la energía eléctrica de la red y, a un generador se le produce el giro del rotor (mediante una turbina hidráulica, una turbina de gas, un motor de gasoil, las palas de un aerogenerador, etc.) para que genere fem (tensión) que alimenta a una red eléctrica.

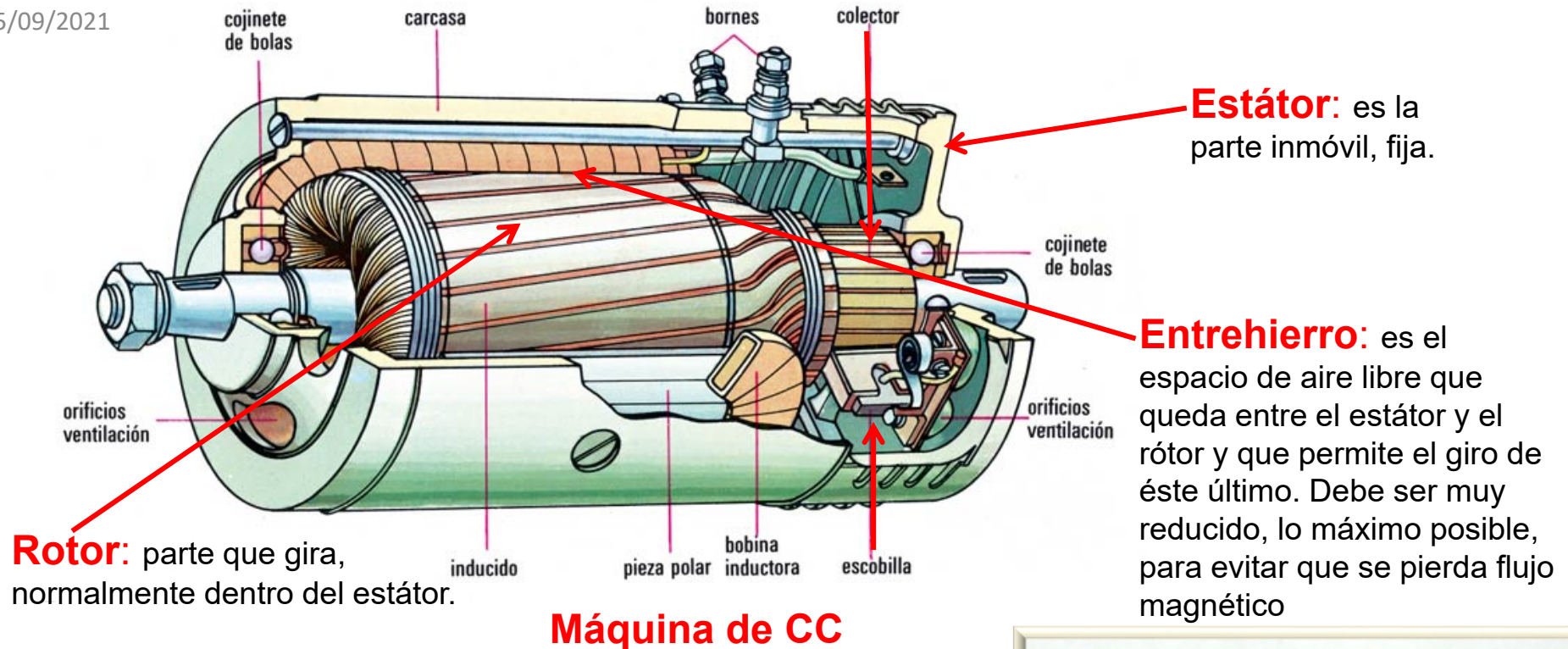
MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. CONSTITUCIÓN

Desde el punto de vista constructivo y funcional, las partes constituyentes de las máquinas eléctricas son las siguientes:

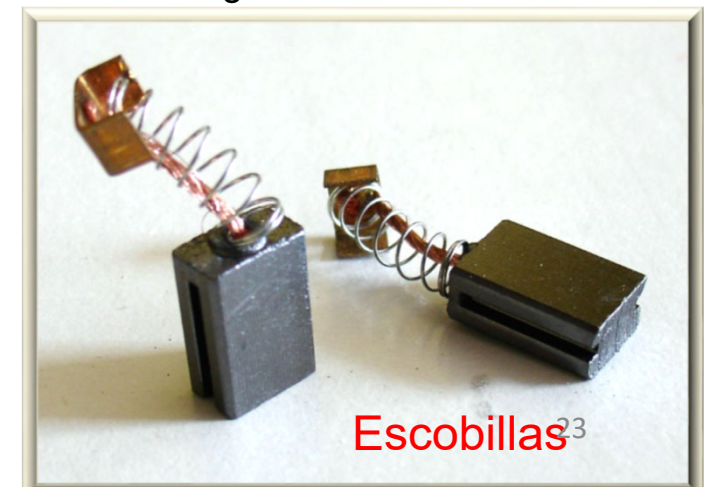


MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS. CONSTITUCIÓN

15/09/2021



Colectores y escobillas: las escobillas realizan la conexión de los circuitos del rotor con los del estátor. Son de grafito aleado con algún otro material metálico. En las máquinas de CC, las escobillas frotan sobre unas láminas conductoras (**delgas**) que están acopladas a un dispositivo cilíndrico denominado **colector**.



FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

15/09/2021

La fem inducida **en un conductor rectilíneo** de longitud activa **L** que se mueve a una velocidad **V**, cuya dirección forma un ángulo **α** con la dirección del campo magnético de inducción uniforme **B**, en cuyo interior se mueve *cortando* sus líneas de fuerza, tiene por valor:

Ley de Inducción de Faraday

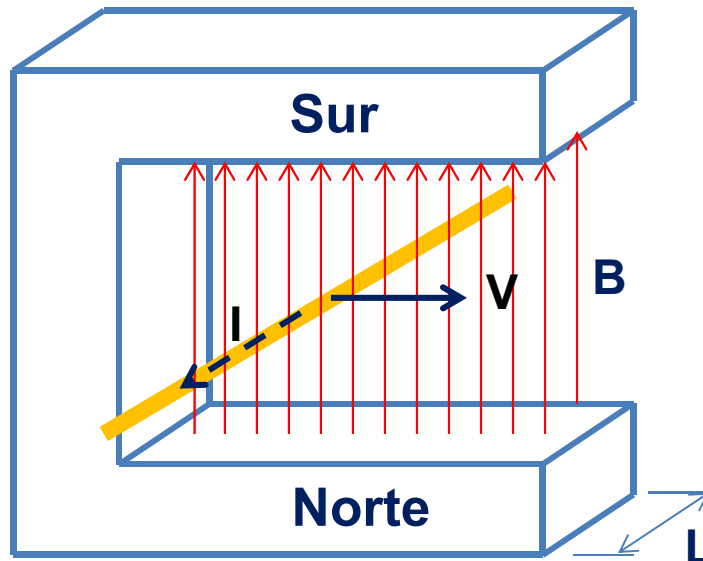
$$\vec{e} = l[\vec{v} \times \vec{B}]$$

$$E = B L V \sin \alpha$$

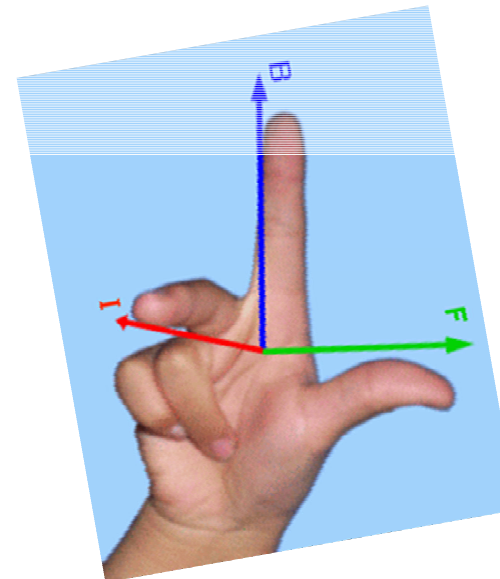
Si las tres magnitudes **son perpendiculares**, entonces el valor de la fem es:

$$E = B L V$$

$$(\alpha=90^\circ \rightarrow \sin \alpha=1)$$



L= Longitud activa del conductor
(la que se encuentra dentro del campo magnético)



Regla de la “mano derecha”

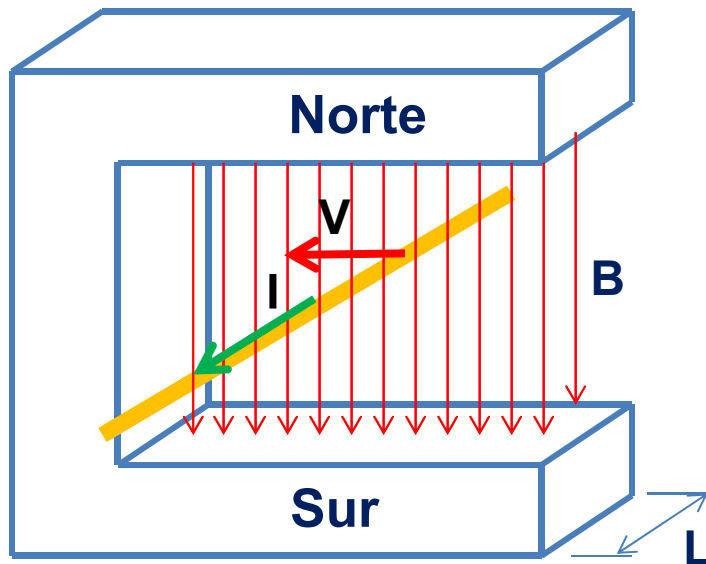
FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

Ley de Inducción de Faraday

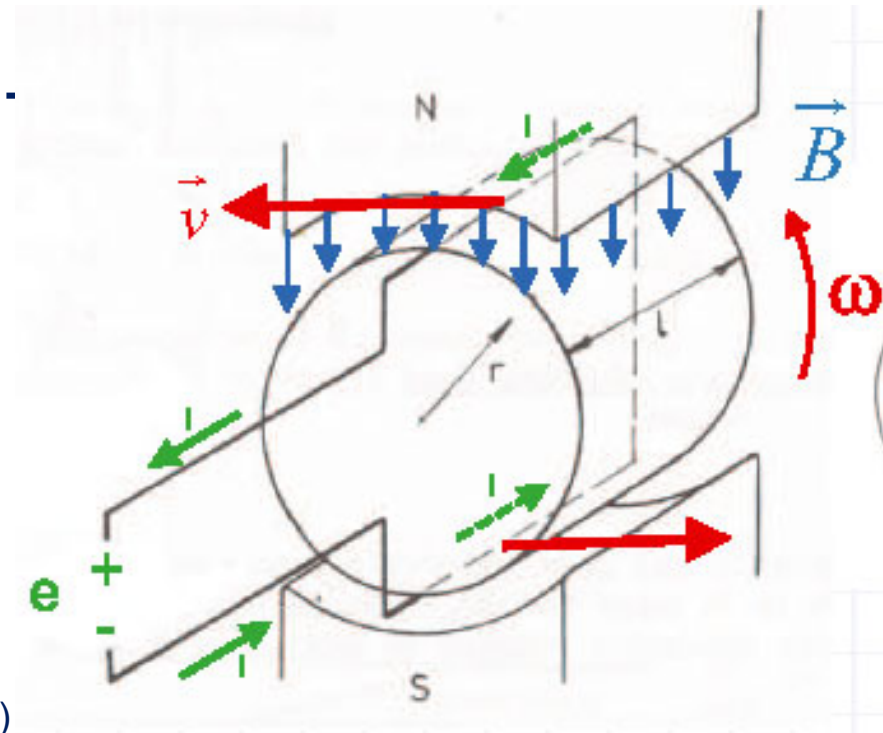
$$\vec{e} = l[\vec{v} \times \vec{B}]$$

$$E = B L V \sin \alpha$$

Si las tres magnitudes **son perpendiculares**, entonces el valor de la fem es: **$E = B L V$**
($\alpha=90^\circ$ ► $\sin \alpha=1$)



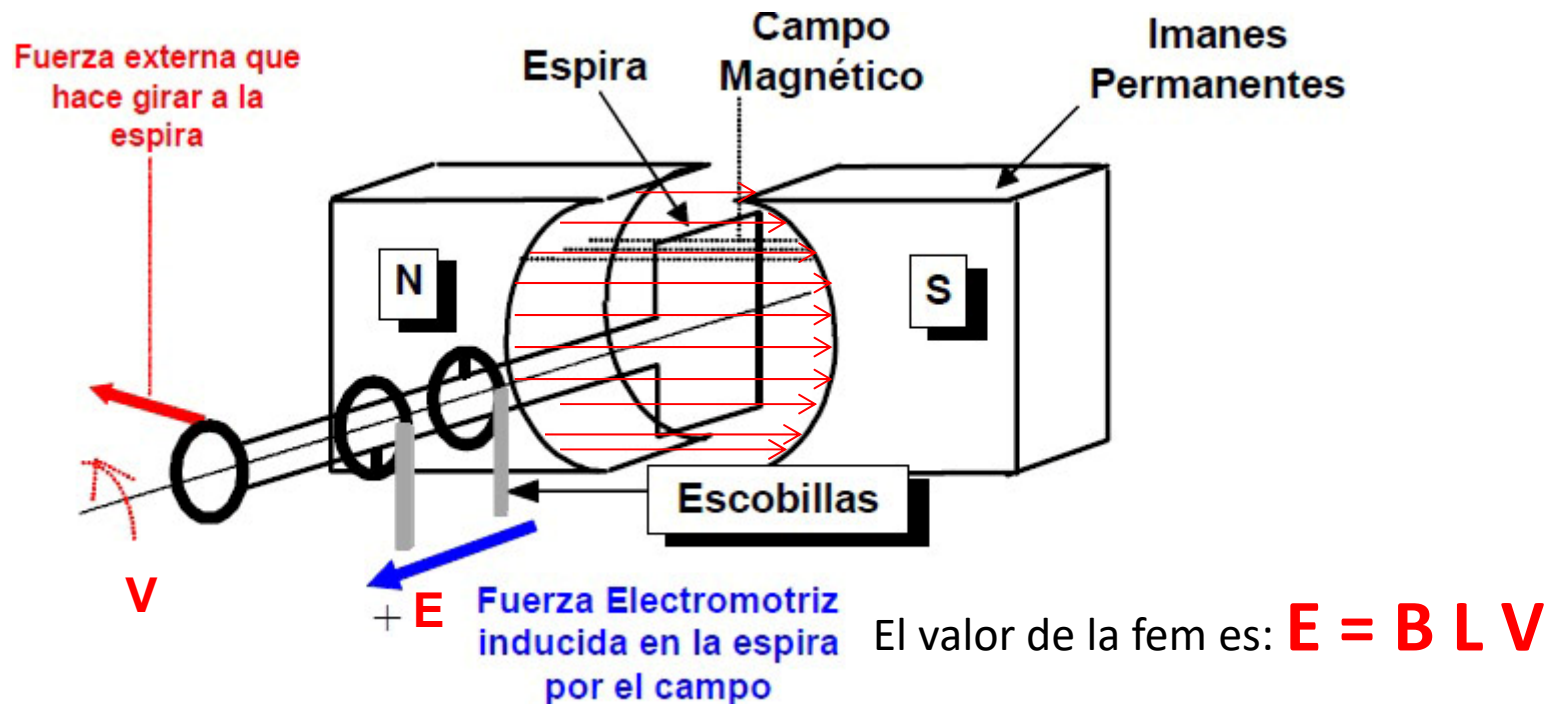
L = Longitud activa del conductor
(la que se encuentra dentro del campo magnético)



Regla de la “**mano derecha**”

FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

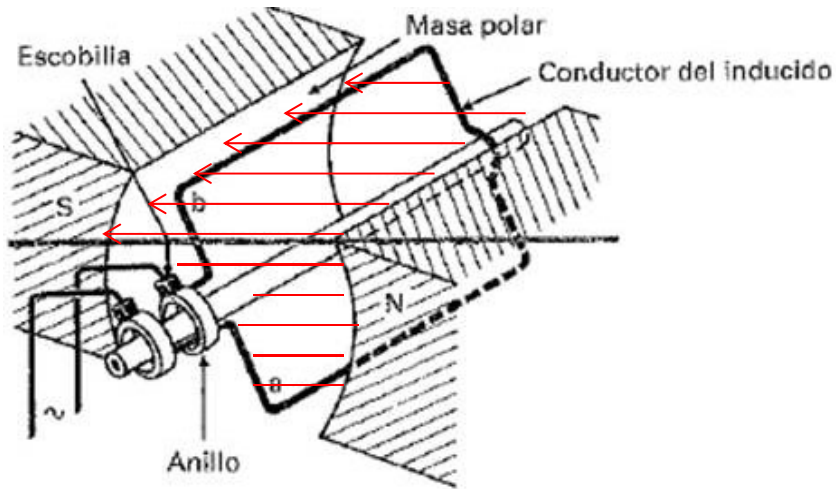
Efecto Generador



Se aplica:
Regla de la “mano derecha”

E =Fuerza Electromotriz inducida
 B = Inducción del campo magnético
 L = Longitud activa del conductor
(la que se encuentra dentro del campo magnético)
 V = Velocidad con que gira la espira

FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA



Quando el flujo magnético concatenado por una espira varía, se genera en ella una fuerza electromotriz conocida como fuerza electromotriz inducida (fem)

La variación relativa de la espira dentro de un campo constante

La variación del flujo abarcado por una espira puede deberse a tres causas diferentes

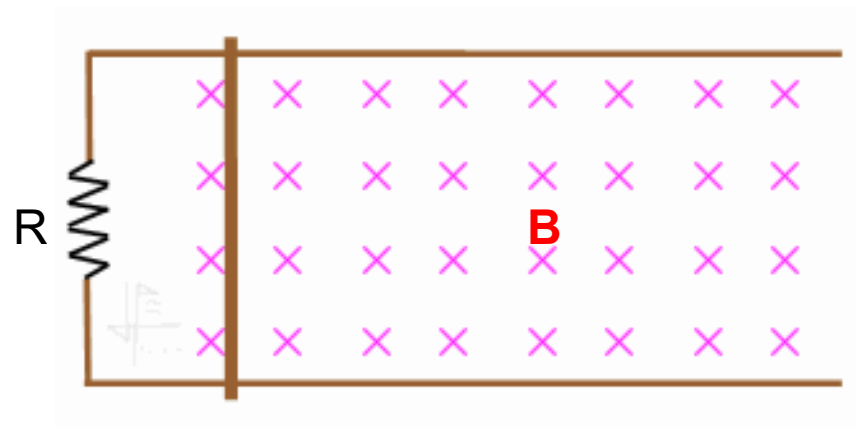
Una combinación de ambas

La variación temporal del campo magnético en el que está inmersa la espira

EFFECTO GENERADOR

Un generador es un dispositivo capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica

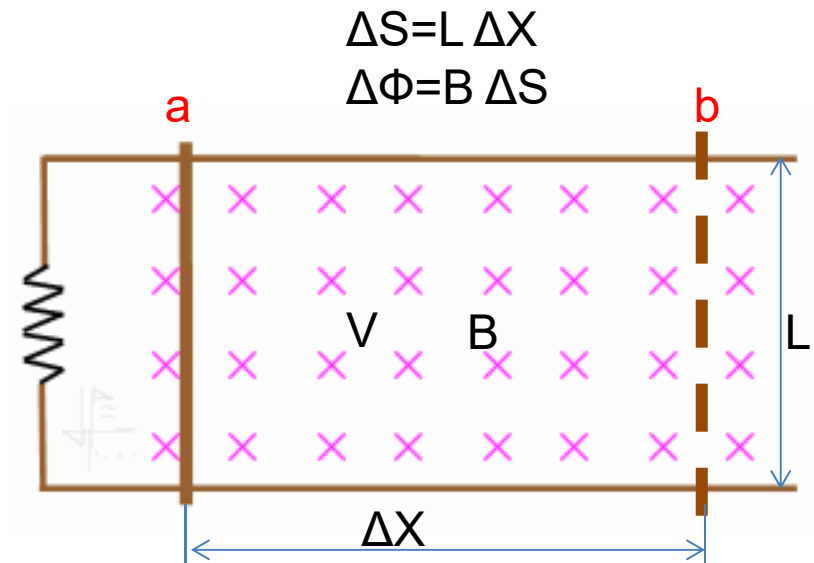
Para ilustrar el efecto generador en un conductor consideramos el ejemplo de la Figura, en el que una barra de material conductor la deslizamos sobre unos “raíles” conductores. El circuito contiene una resistencia que actúa como carga para cerrar el circuito y permitir la circulación de corriente. En presencia de un campo magnético estático uniforme B , va a aparecer una fuerza electromotriz (fem) entre los extremos de la barra cuando un mecanismo externo la pone en movimiento.



FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

Fem producida por el conductor **$E = B L V$**

Esta fórmula también se puede poner de otra forma:



La velocidad V , vendrá dada por:

$$V = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$
$$E = B L \frac{\Delta X}{\Delta t} = B \frac{L \Delta X}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$
$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

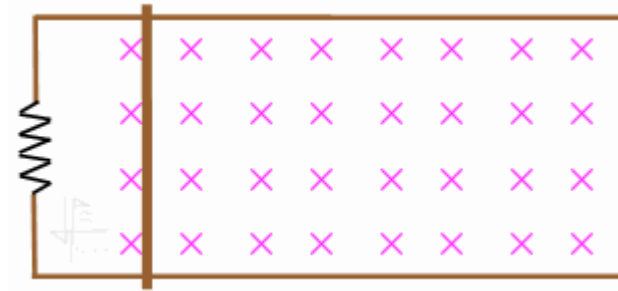
⇒ **Ley de Faraday** ⇒

“El valor absoluto de la fuerza electromotriz inducida está determinado por la velocidad de variación del flujo que la genera”

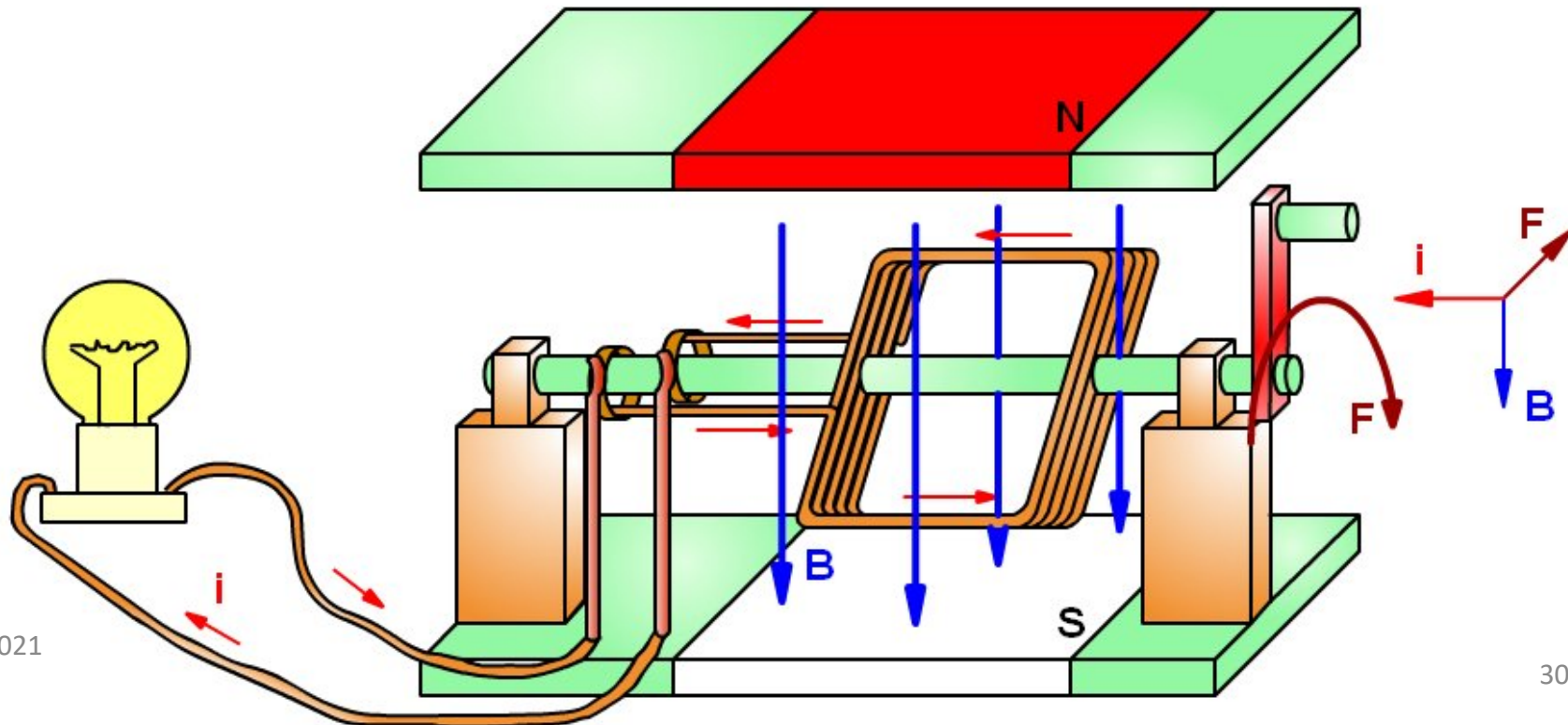
FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

Se genera una fem $\mathcal{E}$ mientras el conductor se mueve, *cortando* las líneas de fuerza del campo magnético:

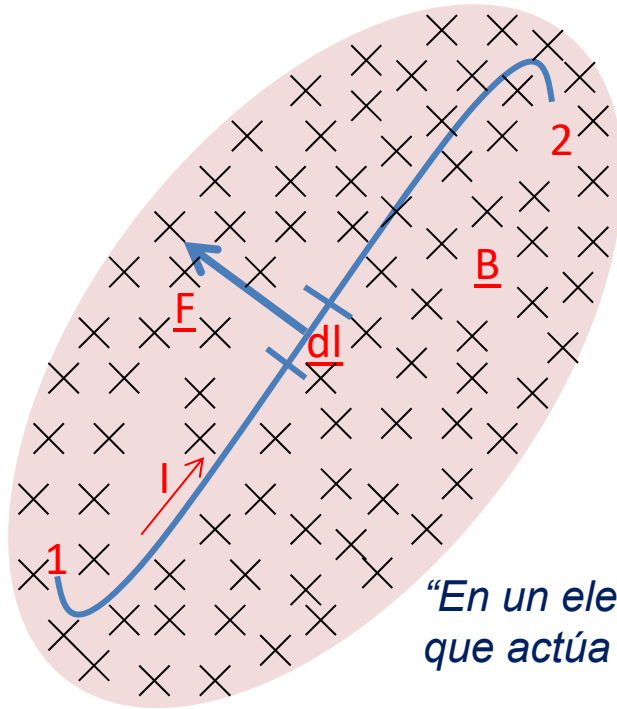
$$\mathcal{E} = B L V$$



Si los conductores activos forman parte de una espira que gira en el interior de un campo magnético tendríamos un generador elemental de CC:



FUERZA ELECTROMAGNETICA



$$\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}$$

$$d\vec{F} = I dt (\vec{dl}/dt) \times \vec{B} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = \int_1^2 I d\vec{l} \times \vec{B}$$

➡ 2ª Ecuación de Laplace

“En un elemento de corriente dentro de un campo magnético, la fuerza que actúa es siempre normal al elemento de corriente y al campo”.

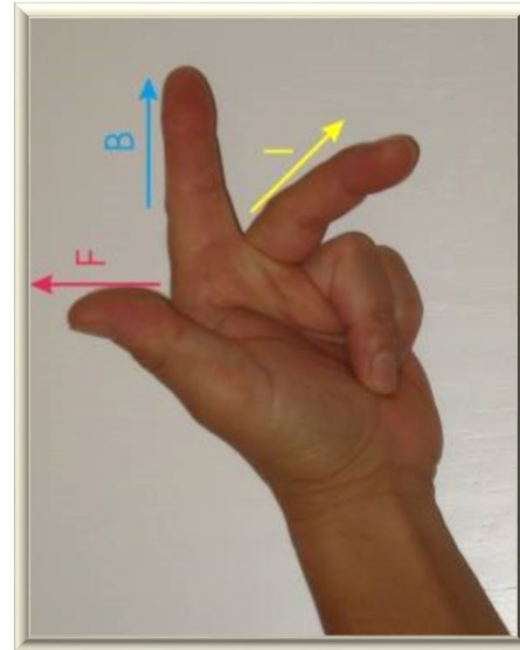
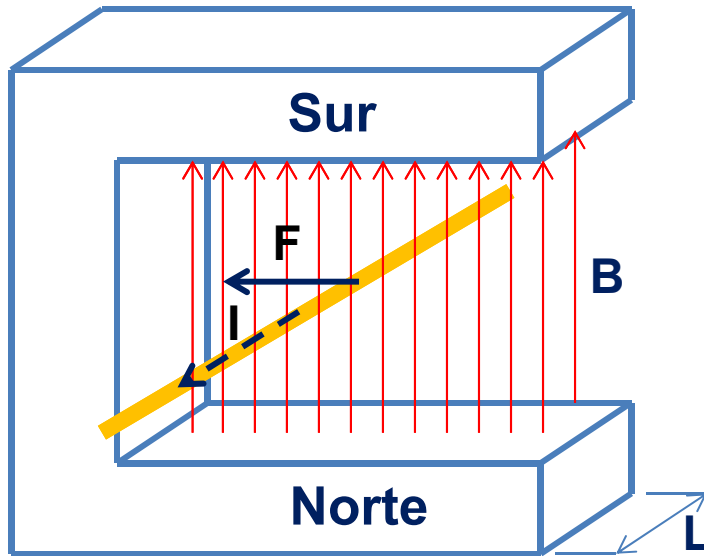
La fuerza sobre **un conductor rectilíneo** de longitud **L** por el que circula una corriente **I**, cuya dirección forma un ángulo **α** con la dirección del campo magnético de inducción uniforme **B**, en cuyo interior se encuentra, tiene por valor:

$$F = I L B \text{ sen}\alpha$$

Si las tres magnitudes **son perpendiculares**, como generalmente ocurre en las máquinas eléctricas, entonces el valor de la fuerza electromagnética es:

$$F = I L B$$

FUERZA ELECTROMAGNETICA



L = Longitud activa del conductor
(la que se encuentra dentro del campo magnético)

Regla de la “mano izquierda”

Ley de Laplace:

$$\vec{F} = l [\vec{I} \times \vec{B}]$$

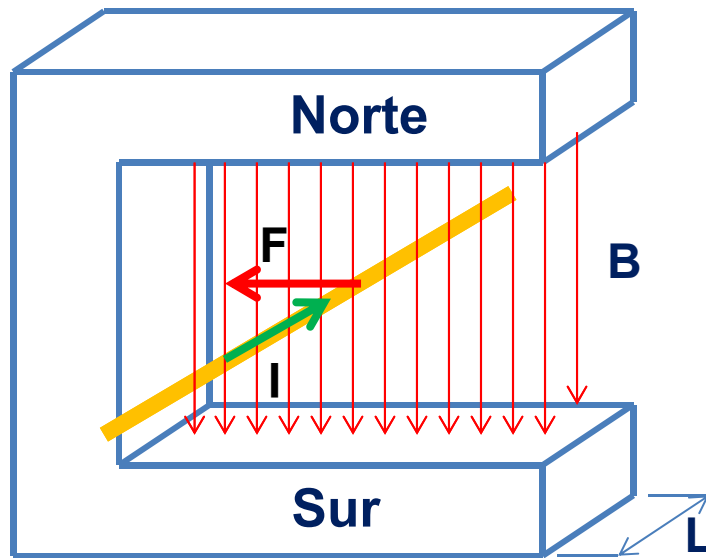
$$\alpha = 90^\circ$$



$$F = I L B$$

FUERZA ELECTROMAGNETICA

Efecto Motor



L = Longitud activa del conductor
(la que se encuentra dentro del campo magnético)

Regla de la “mano izquierda”

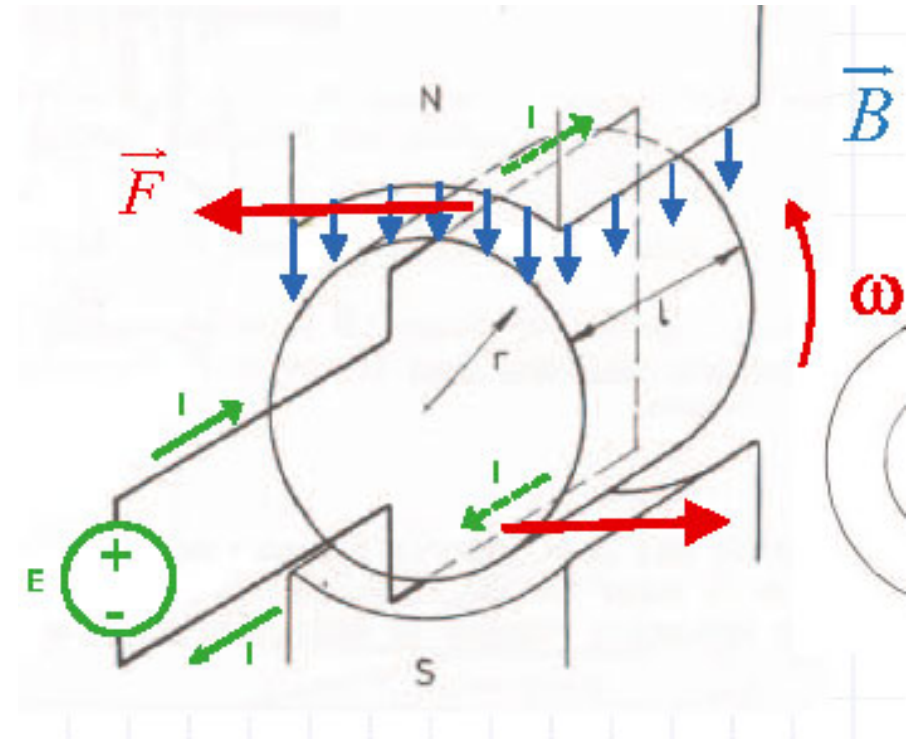
Ley de Laplace:

$$\vec{F} = l [\vec{I} \times \vec{B}]$$

$$\alpha = 90^\circ$$



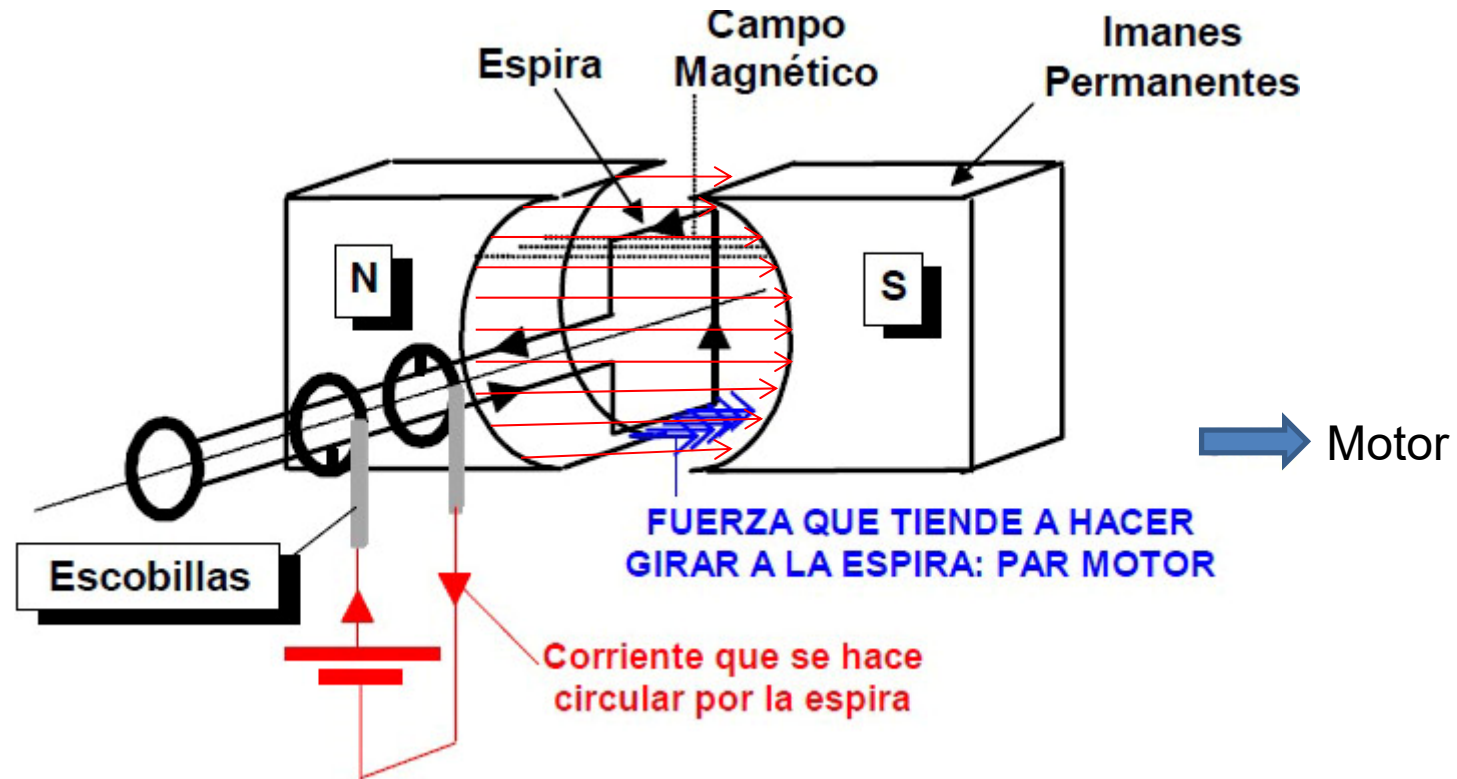
$$F = I L B$$



FUERZA ELECTROMAGNETICA

Efecto Motor

15/09/2021



Se aplica:

Regla de la “mano izquierda”

Ley de Laplace:

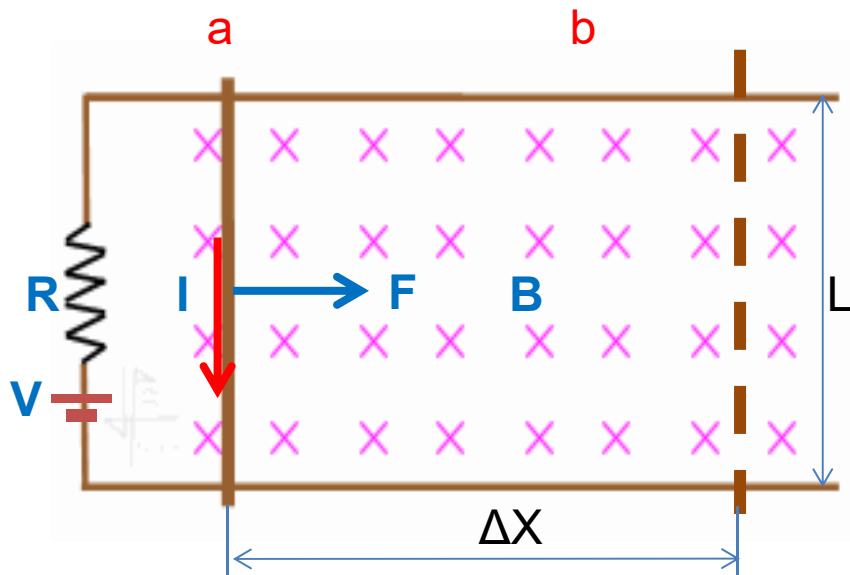
$$\vec{F} = l [\vec{I} \times \vec{B}]$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$F = I L B$$

EFEECTO MOTOR

Ahora se va a describir el efecto dual que es la creación de movimiento a partir de energía eléctrica. Para tal estudio se presenta en la figura un barra metálica que puede deslizarse sobre unos raíles conductores. En el medio donde se encuentra la barra tenemos un campo magnético uniforme. En el circuito se coloca una pila en serie con una resistencia. Al establecer la tensión va a circular una corriente en el circuito tal que:



$$V = R I$$

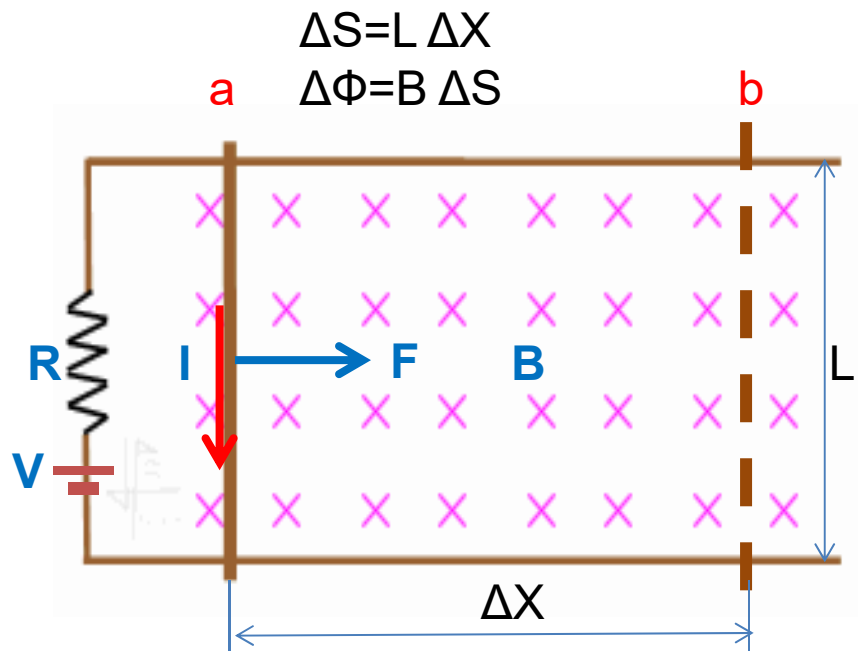
La corriente circulando por la barra va a crear una fuerza de arrastre sobre la barra debido a las fuerzas de **Laplace**.

Se expresa la fuerza aplicada a la barra como:

$$\underline{F} = L \underline{I} \times \underline{B}$$

FUERZA ELECTROMAGNETICA

Esta fuerza desarrolla un trabajo de valor:



Fuerza sobre el conductor:

$$F = I L B$$

Trabajo desarrollado al desplazarse de a a b :

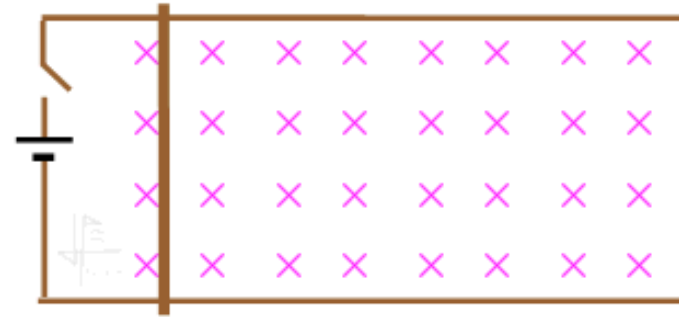
$$W = F \Delta X = I L B \Delta X = I B \Delta S$$

$$W = I \Delta \Phi$$

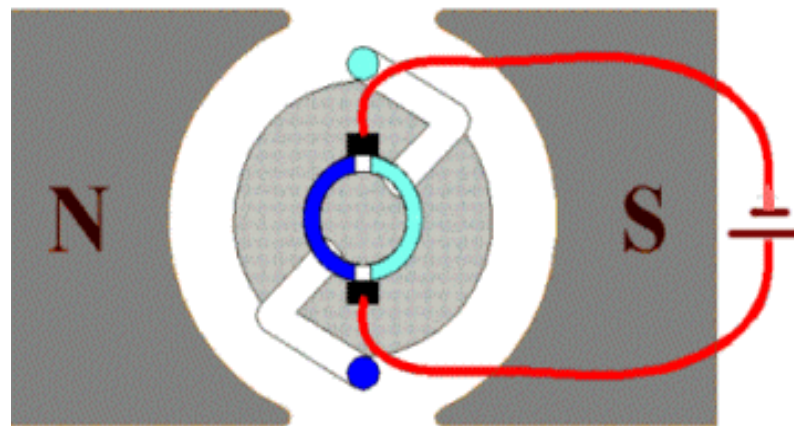
FUERZA ELECTROMAGNETICA

El conductor se mueve a causa de una fuerza $\mathbf{F}$ que se origina cuando por él circula una intensidad I :

$$\mathbf{F} = I \mathbf{L} \mathbf{B}$$



Si los conductores activos forman parte de una espira en el interior de un campo magnético, por la que circula una corriente, tendríamos un motor elemental de CC:



LEY DE LENZ



Heinrich Friedrich Lenz
(1804-1865)



“La polaridad de la fem inducida es tal que está tiende a producir una corriente que crea un flujo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético a través del circuito”.

Es decir, la corriente inducida tiende a mantener el flujo original a través del circuito.

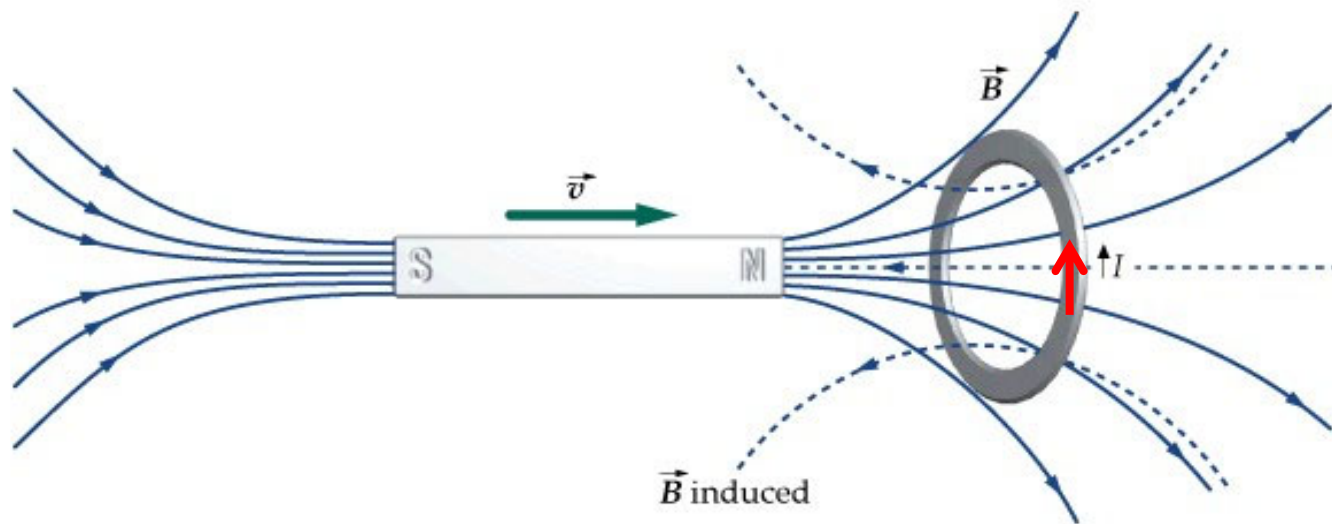
“Las fem inducidas tienen un sentido tal que con sus efectos tienden a oponerse a las causas que las producen”

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

LEY DE LENZ

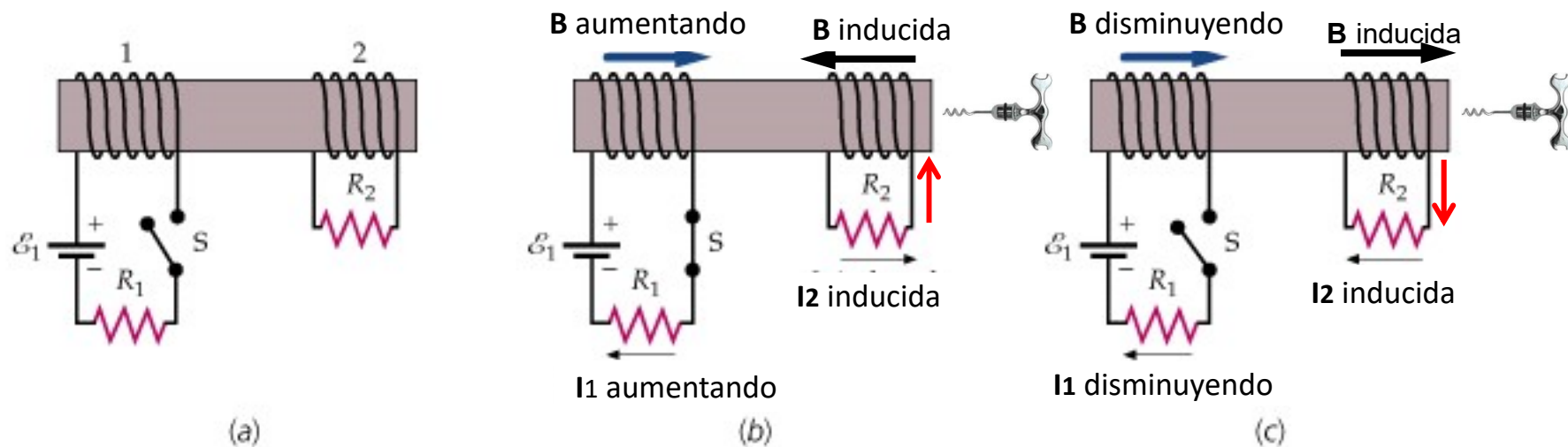
“La fem y la corriente inducida tienen una dirección y sentido tal que tienden a oponerse a la causa que las produce”.

- En esta figura el movimiento del imán hacia la espira aumenta el flujo que pasa por ella.
- La corriente inducida en la espira produce un campo magnético propio.
- El sentido de esta corriente es aquel que produce un flujo magnético que se opone al del imán. El campo magnético inducido tiende a disminuir el flujo que atraviesa la espira.



LEY DE LENZ

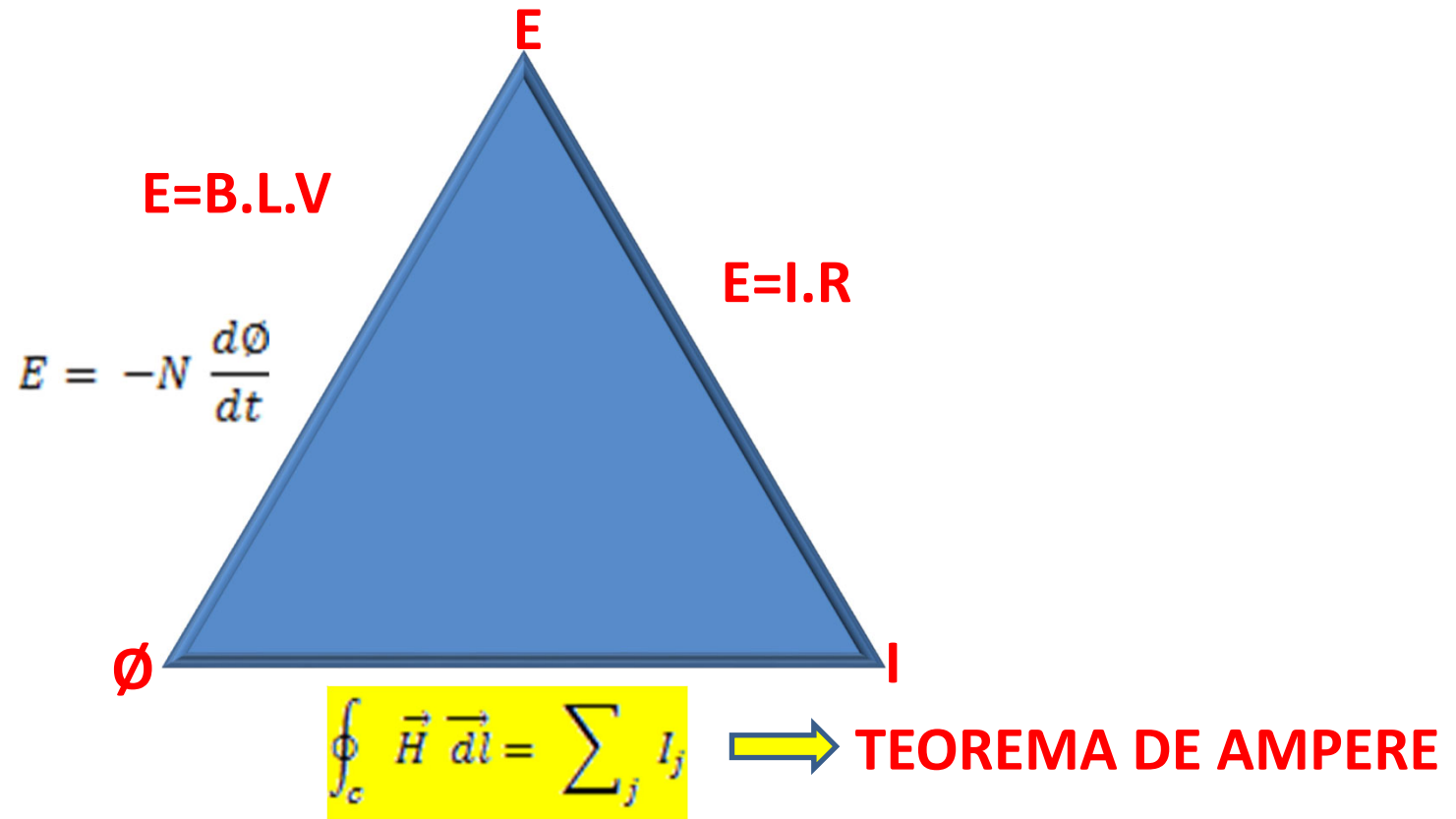
- ➡ En esta figura cuando se hace variar la corriente en el circuito 1, hay un cambio en el flujo que atraviesa el circuito 2 (figura (a)).
- ➡ En la situación (b) al aumentar la corriente que pasa por el circuito 1, hay un aumento del flujo que pasa por el circuito 2:
 - La corriente en el circuito 2 tiene el sentido que hace que el campo magnético inducido produzca un flujo que se oponga al aumento producido por el circuito 1.



Situación (c), disminución del flujo que pasa por el circuito 2:

- La corriente en el circuito 2 tiene el sentido que hace que el campo magnético inducido produzca un flujo que se oponga a la disminución producida por el circuito 1.

CORRELACIÓN GRÁFICA

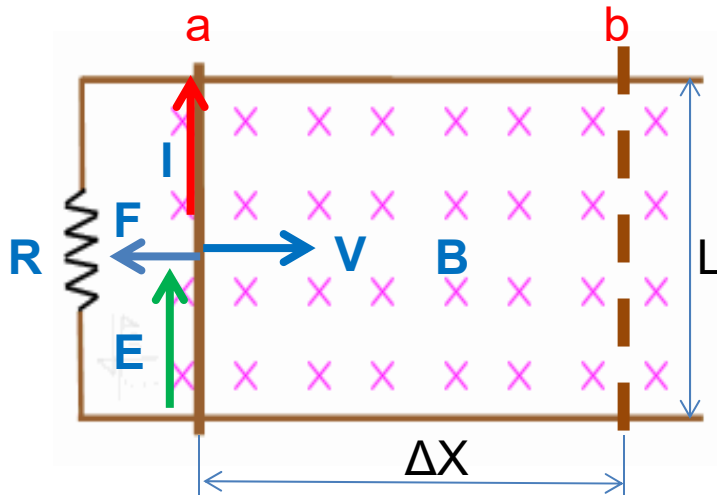


$$\Phi = \iint_s \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H}$$

ESTUDIO DEL GENERADOR ELEMENTAL

Generador



Sea un campo magnético $\mathbf{B}$
y un conductor rectilíneo que
se mueve a la velocidad $\mathbf{V}$

Fem en el conductor
(regla mano derecha)

$$\mathbf{E} = \mathbf{B} \mathbf{L} \mathbf{V}$$

Corriente $\mathbf{I}$

La potencia eléctrica

$$\mathbf{P_E} = \mathbf{E} \mathbf{I} = \mathbf{B} \mathbf{L} \mathbf{V} \mathbf{I}$$

Fuerza en el conductor que
se opone al movimiento
(regla mano izquierda)
Fuerza resistente

$$\mathbf{P_M} = \mathbf{P_E}$$

La potencia mecánica

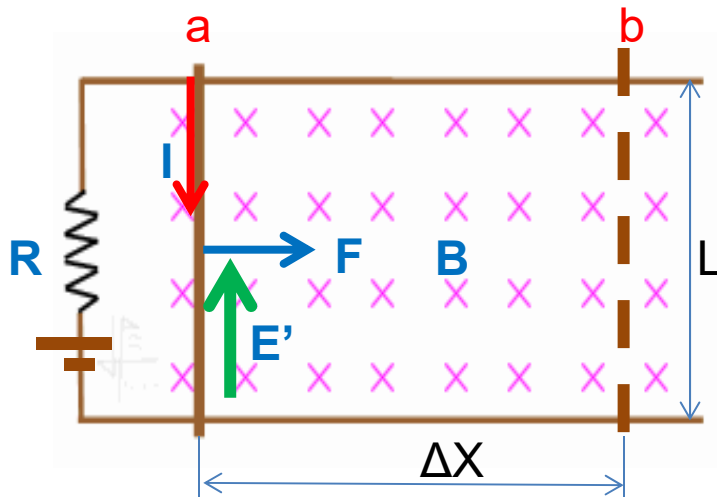
$$\mathbf{F} = \mathbf{I} \mathbf{L} \mathbf{B}$$

$$\mathbf{P_M} = \mathbf{F} \mathbf{V} = \mathbf{I} \mathbf{L} \mathbf{B} \mathbf{V}$$

ESTUDIO DEL MOTOR ELEMENTAL

15/09/2021

Motor



Sea un campo magnético **B**
y un conductor rectilíneo que
se mueve a la velocidad **V**

Fuerza en el conductor
(regla mano izquierda)
Fuerza motora

$$\mathbf{F = I L B}$$

El conductor se mueve

Fem que se opone al
paso de la corriente
(regla mano derecha)
f_{cem}

$$\mathbf{E' = B L V}$$

La potencia mecánica

$$\mathbf{P_M = FV = I L B V}$$

$$\mathbf{P_M = P_E}$$

La potencia eléctrica:

$$\mathbf{P_E = E I = B L V I}$$

<http://www.tuveras.com/maquinascc/conceptosprevios.htm>