


# Tema 8. Inducción electromagnética

***“Se producirá una corriente eléctrica inducida en un circuito, cuando varíe el flujo magnético que lo atraviesa.”***

Los aparatos se alimentan con energía eléctrica, y necesitan una diferencia de potencial que mantenga la corriente imprescindible para su funcionamiento. Esta diferencia de potencial la proporciona un generador eléctrico

- 
- ESPIRA: hilo conductor que encierra una superficie
  - BOBINA: conjunto de espiras de tal manera que el radio de cada espira es mayor es grande en comparación con la longitud total de la espira
  - SOLENOIDE: conjunto de espiras cuyo radio es pequeño en relación con la longitud total del solenoide

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

# FLUJO MAGNETICO

Un campo magnético puede generar una corriente eléctrica.

- ▶ La **inducción electromagnética** es la generación de corriente eléctrica inducida por un campo magnético variable.
- ▶ Un campo magnético variable produce una fuerza electromotriz capaz de generar una corriente eléctrica sin necesidad de establecer conexiones con ninguna fuente de alimentación.
- ▶ La corriente es inducida por la variación de flujo magnético
- ▶ Se llama flujo magnético  $\Phi$  a través de una superficie, al producto escalar del vector campo magnético  $B$  por el vector superficie  $S$
- ▶ El flujo magnético es el número de líneas del campo magnético que atraviesan una superficie dada.
- ▶ Para variar el flujo magnético puedo:
  - ▶ Variar el campo ( $B$ ): Acercar o alejar el imán a la espira O Acercar o alejar la espira al imán.
  - ▶ Variar la superficie ( $S$ ): Deformar la espira.
  - ▶ Variar el angulo girando la espira

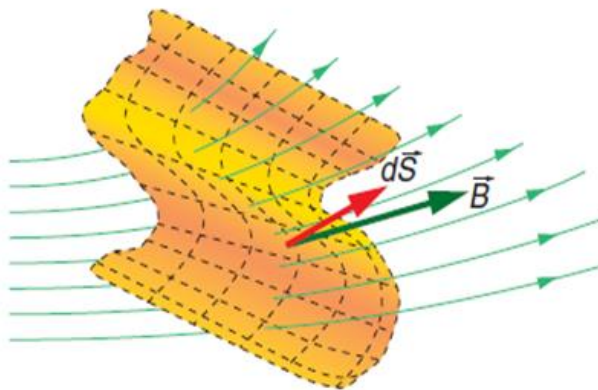
- Es proporcional al número de líneas de campo que atraviesa la superficie considerada

- Se calcula de igual forma que el flujo eléctrico:  $\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

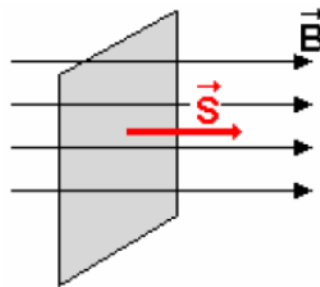
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

- Para realizar los calculos, se divide la "S" en pequeñas superficies planas "ds", donde el campo magnético sea uniforme

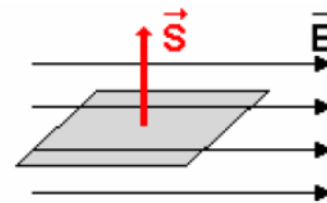
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \int_S d\vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \theta$$



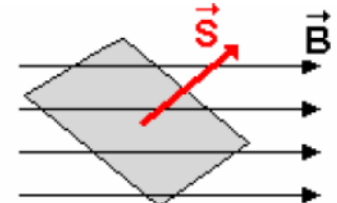
$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \Rightarrow \Phi = B S \cos \phi$$



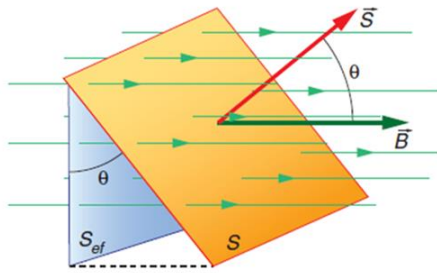
$$\Phi_{\text{Máx}} = B S$$



$$\Phi = 0$$



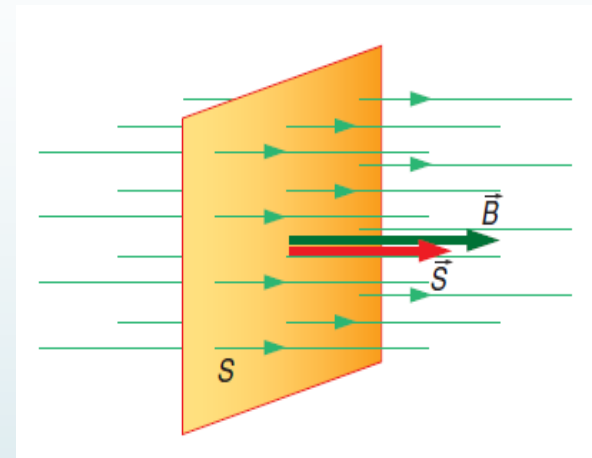
$$\Phi = B S \cos \phi$$



$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad \Rightarrow \quad \Phi = B S \cos \varphi$$

- Si la superficie plana es perpendicular al campo magnético → flujo máximo porque el ángulo es 90 y su coseno 1:

$$\Phi_B = B \cdot S$$



- Unidad de flujo magnético en el S.I.: Wb (WEBER □ 1 wb=1t·m2)
- Las líneas de campo magnético son cerradas, por lo que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo:

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

- Si la superficie es abierta el flujo será positivo, negativo o nulo según la posición relativa de los vectores b y s

# FUERZA ELECTRO MOTRIZ

f.e. Necesaria para producir un movimiento ordenado de cargas

- Como el movimiento de la carga tiende a igualar el potencial de los extremos, necesitamos un agente exterior que aporte la energía necesaria para mantener la diferencia de potencial
- LA f.e.m. Es el trabajo realizado por el agente exterior por cada unidad de carga que lo atraviesa, y es característico de cada generador

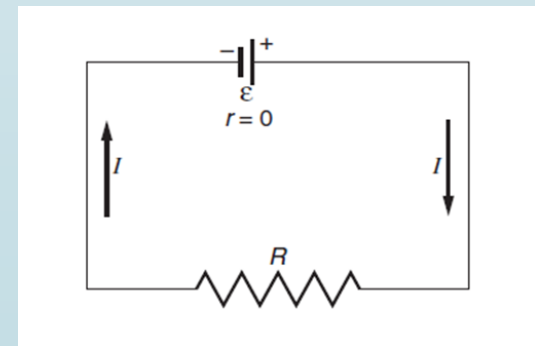
$$\mathcal{E} = \frac{W_{ext}}{q}$$

- En un generador ideal no existen pérdidas de energía eléctrica porque la resistencia eléctrica es nula y la f.e.m. coincide con la diferencia de potencial entre los polos  $\Delta V$
- Podemos calcular la corriente que circula por el circuito en este caso con la ley de ohm:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{\mathcal{E}_{ideal}}{R}$$

Pag 233 nº1 a 4

Pag 254 nº1,4,5,6,7

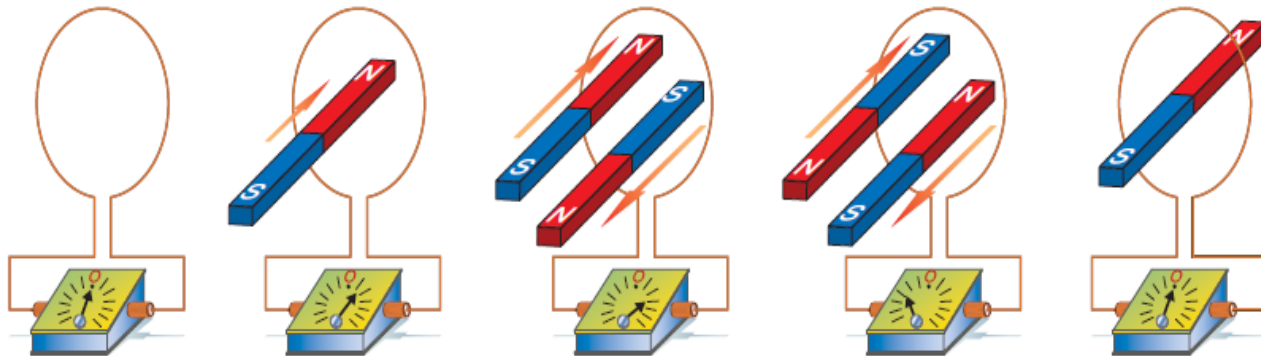


# Experiencias de Faraday y Henry

- OERSTED → Brújula y corriente eléctrica en distinto sentido. Da pie a:
  - Ampère demostró que toda corriente eléctrica produce un campo magnético  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum I$
  - Faraday estaba convencido de que también un campo magnético debía producir una corriente eléctrica
    - Experiencias con campos magnéticos constantes fracasaron
    - En 1832 descubrió que un campo magnético variable sí produce una corriente eléctrica

## ► PRIMERA EXPERIENCIA DE FARADAY: conecta una espira a un galvanómetro

- El galvanómetro sólo mide paso de corriente cuando el imán está en movimiento
- Si el imán está detenido, el galvanómetro marca 0
- El sentido de la corriente varía según el polo del imán que acerquemos
- Cuanto más rápido acerquemos o alejemos el imán, mayor es la corriente





## ► PRIMERA EXPERIENCIA DE FARADAY:

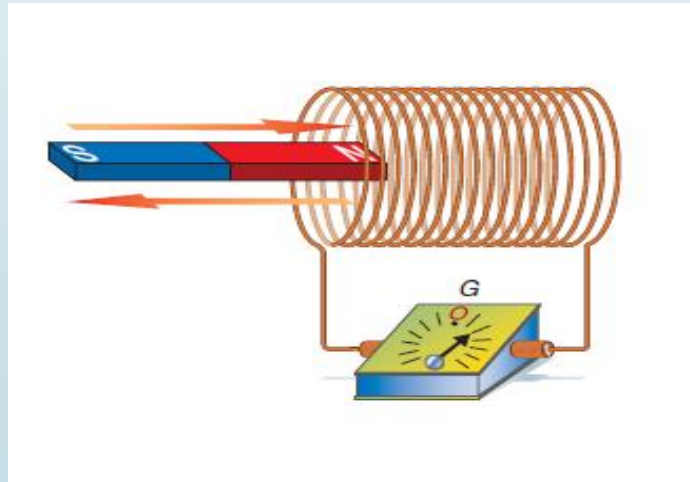
- Llamamos inductor al agente que produce el campo magnético, que en esta experiencia es el imán
- Llamamos circuito inducido o secundario al circuito en el que, no habiendo ningún generador de corriente, aparece una corriente inducida (espira + galvanómetro)
- La intensidad de la corriente inducida depende de:
  - LA RAPIDEZ CON QUE SE MUEVE EL IMÁN
  - LA SUPERFICIE DE LA ESPIRA
  - EL CAMPO QUE CREA EL IMÁN
  - El sentido depende del polo que se acerque o aleje

## ➤ SEGUNDA EXPERIENCIA DE FARADAY:

- Se cambia la espira por un solenoide, lo que permite observar el mismo fenómeno de forma más acusada

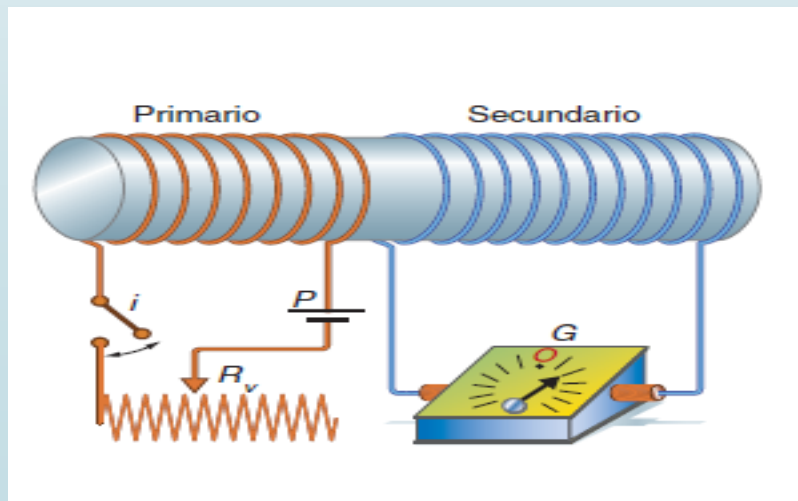


- La intensidad es proporcional al número de espiras de la bobina del circuito inducido



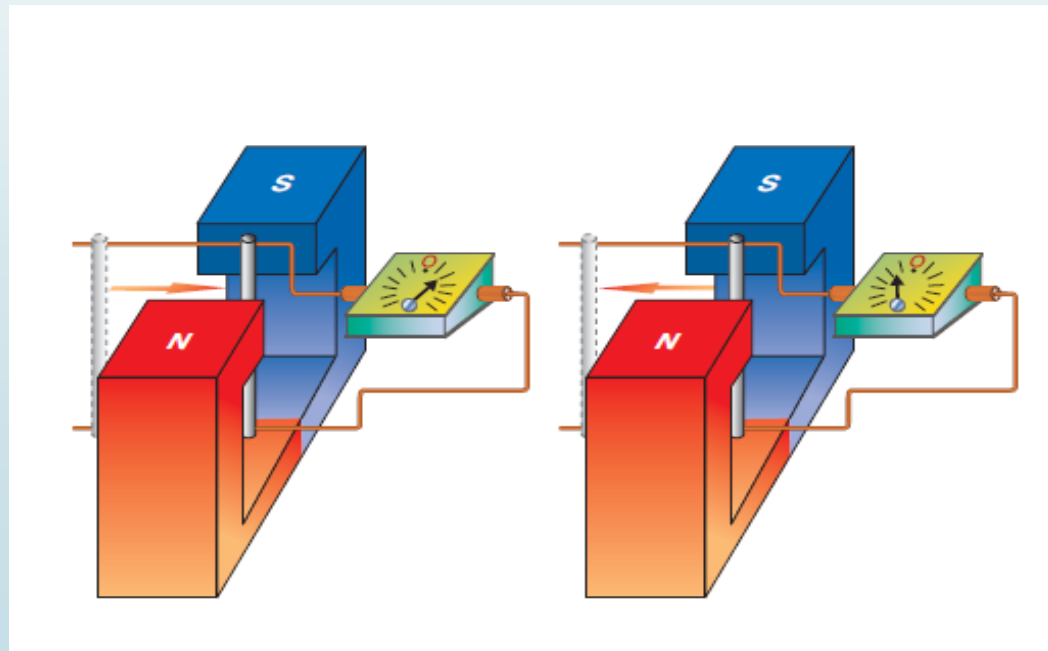
## ► TERCERA EXPERIENCIA DE FARADAY:

- Circuito formado por dos solenoides, una resistencia variable, una pila y un galvanómetro
- Los solenoides de los circuitos inductor e inducido están montados sobre el mismo núcleo de hierro
- El galvanómetro sólo indica paso de corriente si:
  - Cerramos o abrimos el circuito inductor. Si se deja abierto de modo continuo no hay corriente inducida
  - Modificamos la resistencia variable



## ➤ EXPERIENCIA DE HENRY:

- Descubrió la inducción electromagnética a la par que Faraday pero sin comunicarse con él, coincidieron
- Comprobó que se generaba una corriente eléctrica al mover perpendicularmente un conductor dentro del campo magnético existente entre los polos del imán, puesto que aparecía una diferencia de potencial entre sus extremos
- Solo existía corriente inducida si el flujo magnético varía en el tiempo





➔ CONCLUSIÓN DE AMBAS EXPERIENCIAS:

➔ SÓLO EXISTE CORRIENTE INDUCIDA  
SI EL FLUJO MAGNÉTICO VARÍA  
CON EL TIEMPO

## LEY DE FARADAY:

Faraday y Henry demostraron que la corriente inducida se debe a la variación del flujo magnético que atraviesa las espiras del circuito inducido

- Para mantener una corriente eléctrica, es necesaria una f.e.m.  
→ por tanto, la variación de flujo magnético produce una f.e.m.
- LEY DE FARADAY: Relaciona la f.e.m. con la variación temporal del flujo magnético que atraviesa el circuito inducido

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Si el flujo magnético es constante no se induce ninguna f.e.m. (f.e.m. = 0)
- La intensidad de la corriente inducida depende de f.e.m. y R

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

► LEY DE FARADAY-LENZ: Lenz determinó que el sentido de la corriente inducida se opone al efecto que la produce (el campo magnético producido por la corriente inducida intenta contrarrestar la variación del flujo magnético del inductor)

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

► Si el flujo varía de forma uniforme con el tiempo:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -\frac{\Phi - \Phi_0}{t - t_0}$$

# VARIACIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO Y CORRIENTE INDUCIDA

- Flujo magnético a través de una espira plana colocada en un campo magnético constante:

$$\Phi_B = B \cdot S \cdot \cos\theta$$

- Cuando varía cualquiera de estos factores,  $(B, S, \theta)$ , varía el flujo magnético

- 1. VARIACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO:

- Faraday movía un imán para modificar el campo magnético que atraviesa las espiras del circuito inducido  $\rightarrow$  si sólo varía el valor del campo  $B$ , la **LEY DE FARADAY-LENZ** para un circuito inducido con  $N$  espiras se convierte en:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d(N \cdot B \cdot S \cdot \cos\theta)}{dt} = -N \cdot S \cdot \cos\theta \cdot \frac{dB}{dt}$$

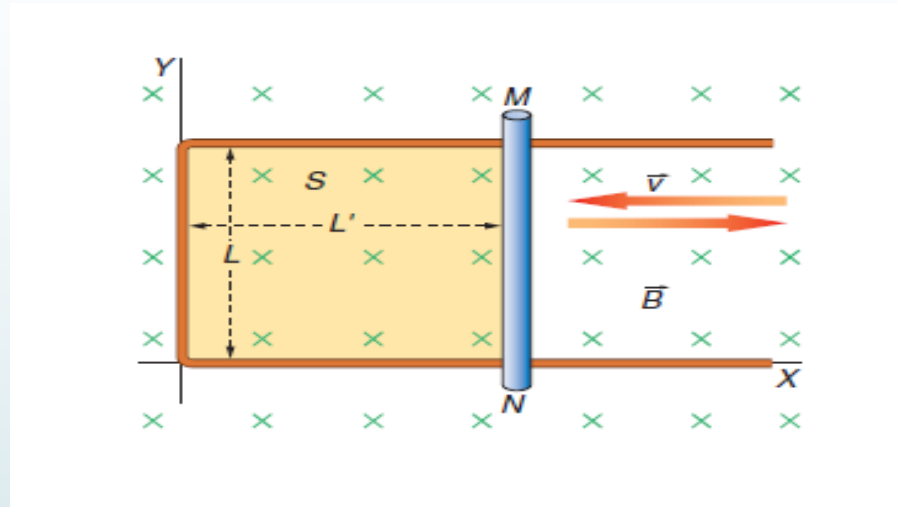
- Si el campo magnético varía de forma uniforme:

$$\varepsilon = - \frac{\Phi_{final} - \Phi_{inicial}}{\Delta t} = -N \cdot S \cdot \cos\theta \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -N \cdot S \cdot \cos\theta \cdot \frac{B_{final} - B_{inicial}}{\Delta t}$$



## ► 2.VARIACIÓN DE LA SUPERFICIE:

Este es el caso de la experiencia de Henry, donde la espira formada por el conductor y la varilla está situada en un campo uniforme de valor  $B$  dirigido perpendicularmente a su plano. Al deslizar el conductor  $MN$ , cambia la superficie de la espira.



- La superficie de la espira es  $S = L \cdot L'$ , donde  $L$  es constante y  $L'$  varía con el tiempo y el campo magnético es perpendicular a la espira ( $\cos \theta = 1$ )

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos\theta)}{dt} = -B \cdot \cos\theta \cdot \frac{dS}{dt}$$

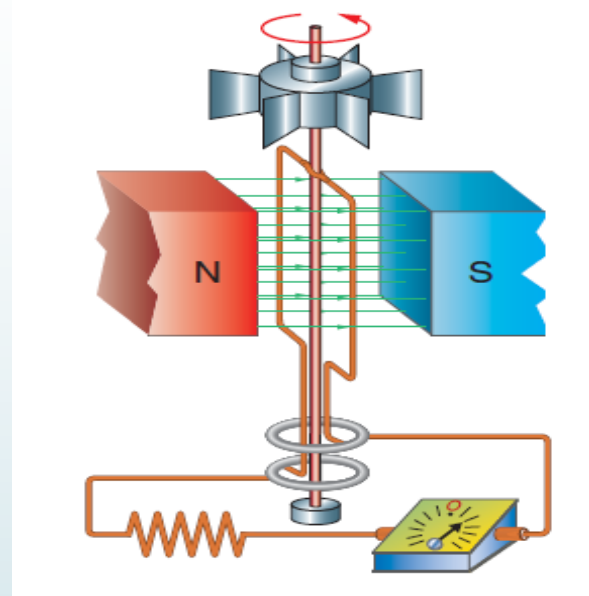
$$\varepsilon = -B \cdot \cos\theta \cdot \frac{dS}{dt} = -B \cdot L \cdot \frac{dL'}{dt}$$

$$\varepsilon = -B \cdot L \cdot v$$

Si, además, el conductor móvil se desplaza a una velocidad constante

### ► 3.VARIACIÓN DEL ÁNGULO CAMPO MAGNÉTICO-ESPIRA:

- Se consigue haciendo girar una turbina cuyo eje está unido a la espira, colocada en un campo magnético



- Manteniendo constantes superficie y valor del campo magnético, la superficie efectiva de la espira varía, variando así el flujo que la atraviesa:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos\theta)}{dt} = -B \cdot S \cdot \frac{d(\cos\theta)}{dt}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B \cdot S \cdot \frac{d(\cos[wt])}{dt} = B \cdot S \cdot w \cdot \text{sen}(wt)$$

Si, además, la espira gira con velocidad constante  $\theta = w \cdot t$

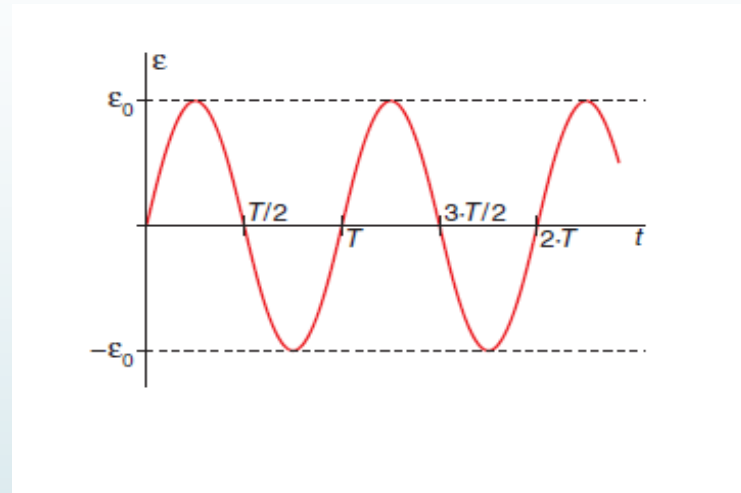
## ► 3.VARIACIÓN DEL ÁNGULO CAMPO MAGNÉTICO-

### ESPIRA:

- La f.e.m. tiene forma sinusoidal y su valor máximo es

$$\varepsilon_0 = B \cdot S \cdot \omega$$

**Cuando**  
**sen ( $\omega t$ ) =**  
**1**



- Este procedimiento es el que utilizan los generadores de las centrales eléctricas para la producción de electricidad

# GENERADORES DE CORRIENTE ELÉCTRICA

## ► FUNCIONAMIENTO:

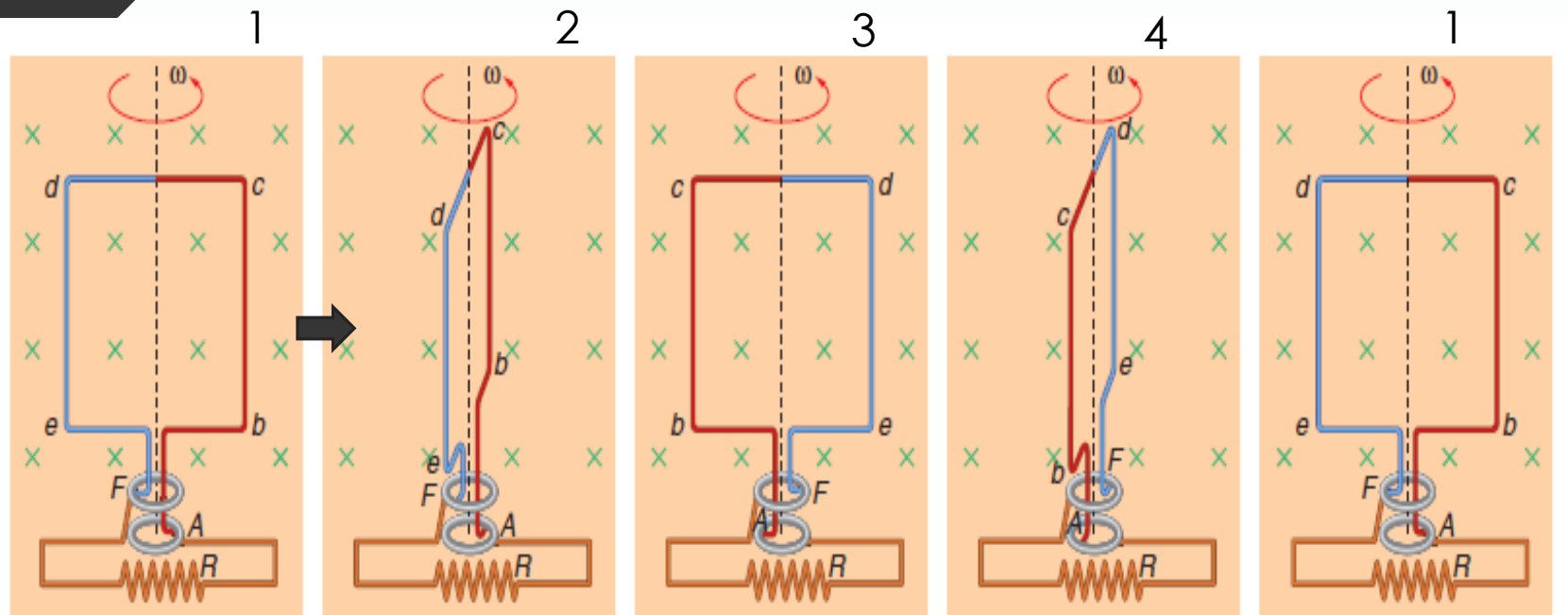
► La energía mecánica hace girar una turbina a cuyo eje está unida la espira, que gira en un campo magnético y transforma esta energía mecánica en energía eléctrica por inducción electromagnética

## ► TIPOS DE GENERADORES:

- Alternador → Produce corriente alterna
- Dinamo → Produce corriente continua

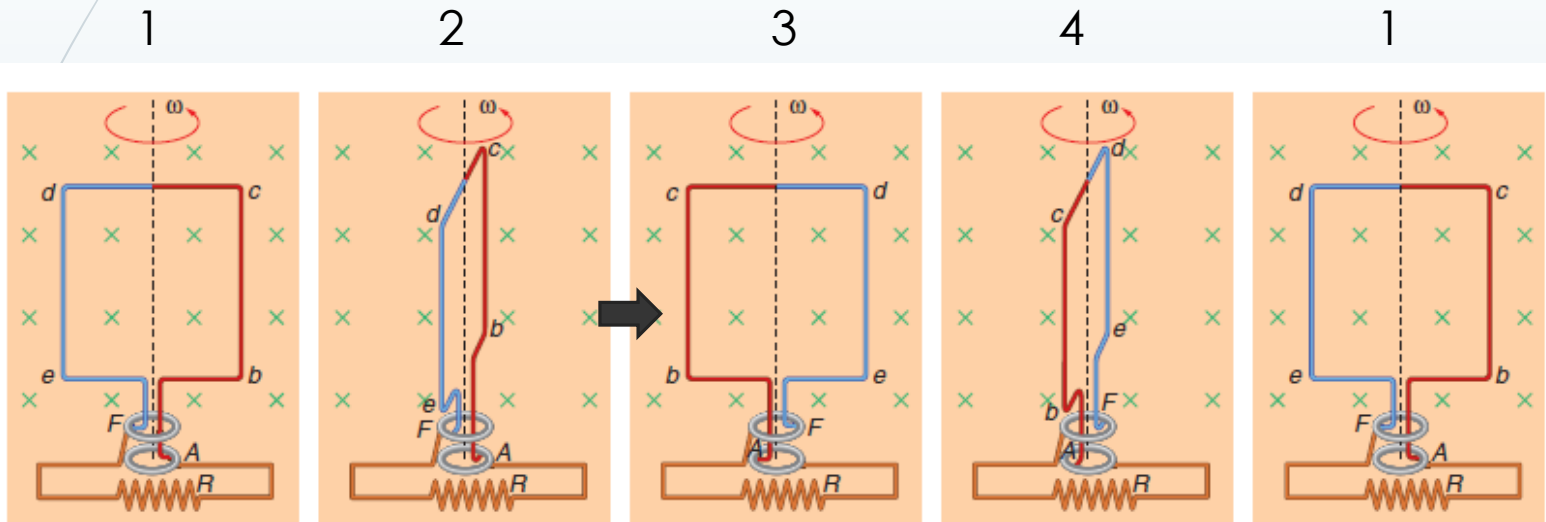
$$\varepsilon = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t)$$

## ► 1. ALTERNADOR

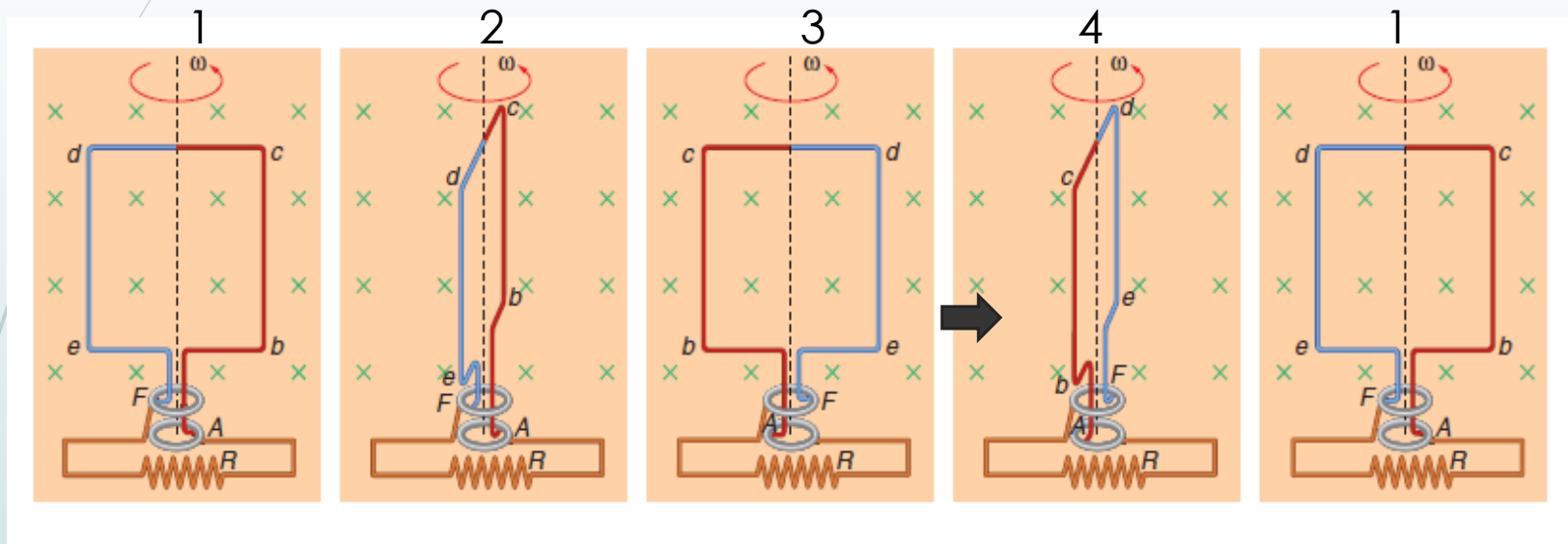


Suponiendo que en la posición 1 el vector superficie y el vector campo magnético tienen la misma dirección y sentido, de 1 a 2 el flujo disminuye, por lo que la corriente inducida generará un campo magnético dirigido hacia adentro (sentido de circulación:  $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow \dots$ )

## 1. ALTERNADOR



De 2 a 3 el flujo es negativo (B y S pasan a formar un ángulo de  $180^\circ$ ), por lo que la corriente inducida generará un campo magnético dirigido hacia afuera (sentido de circulación:  $e \rightarrow d \rightarrow c \rightarrow \dots$ )



De 3 a 4 el flujo es negativo y disminuye en valor absoluto, por lo que la corriente inducida generará un campo magnético dirigido hacia dentro (sentido de circulación:  $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \dots$ )

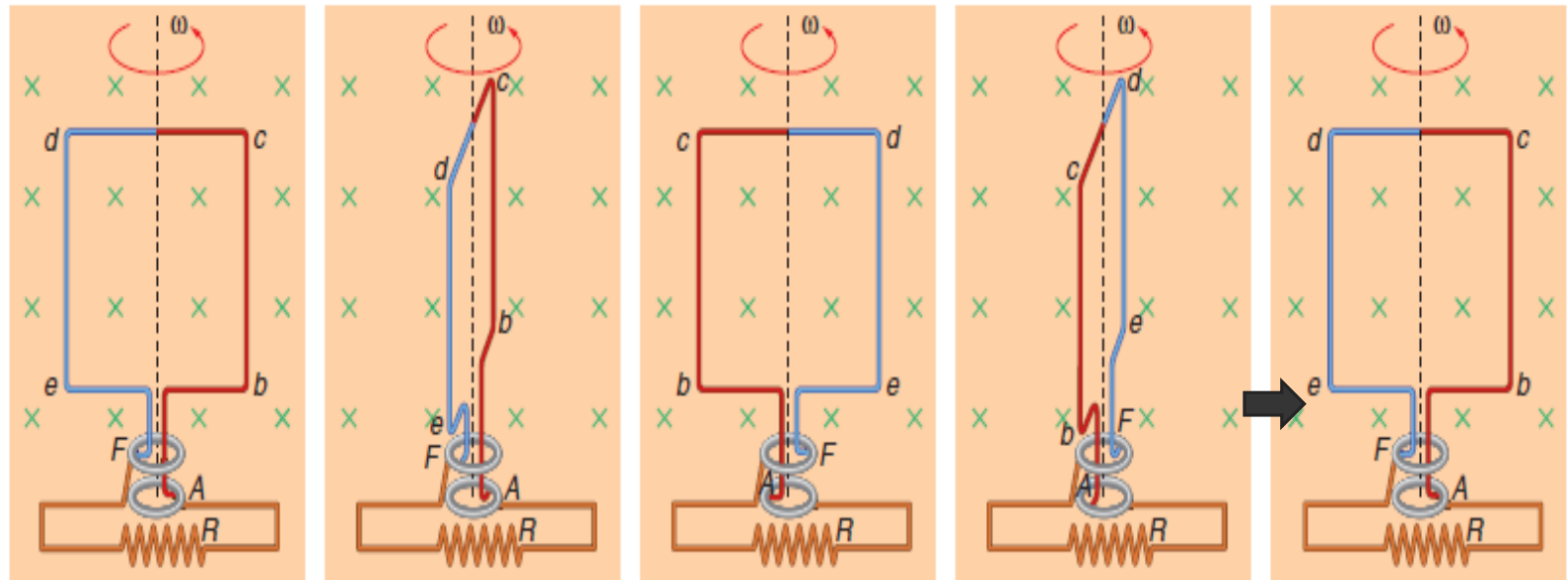
1

2

3

4

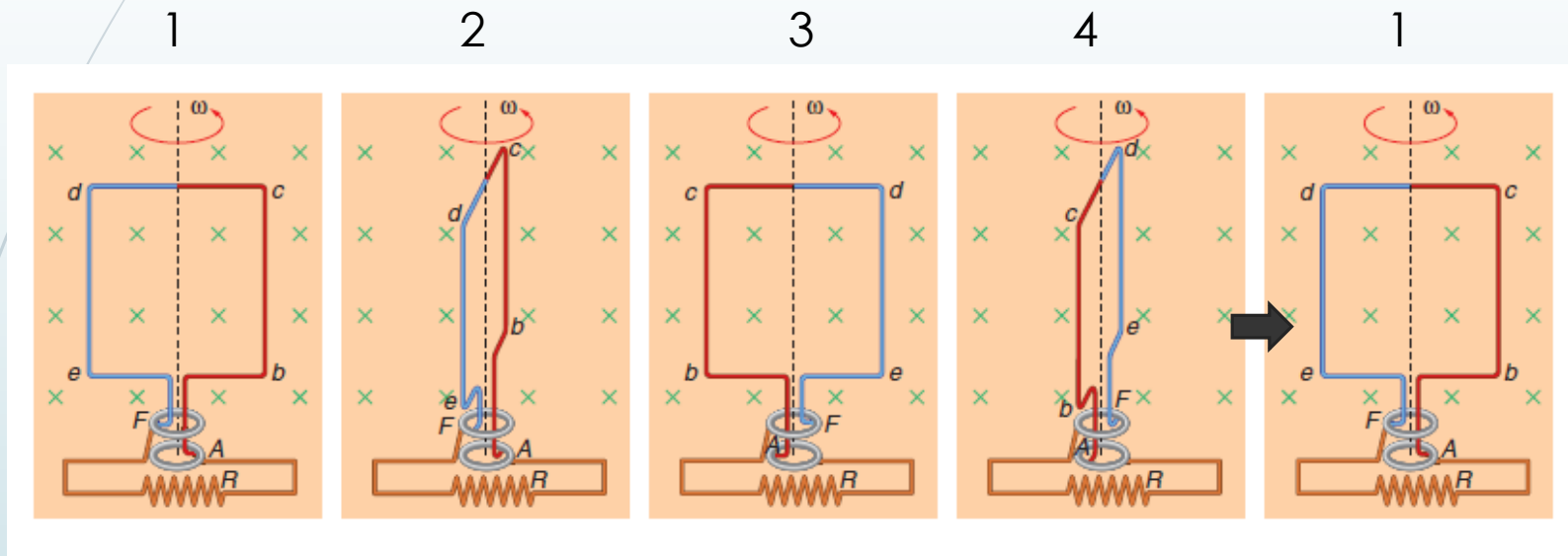
1



De 4 a 1 el flujo es positivo y aumenta, por lo que la corriente inducida generará un campo magnético dirigido hacia afuera (sentido de circulación:  $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow \dots$ )



## 1. ALTERNADOR

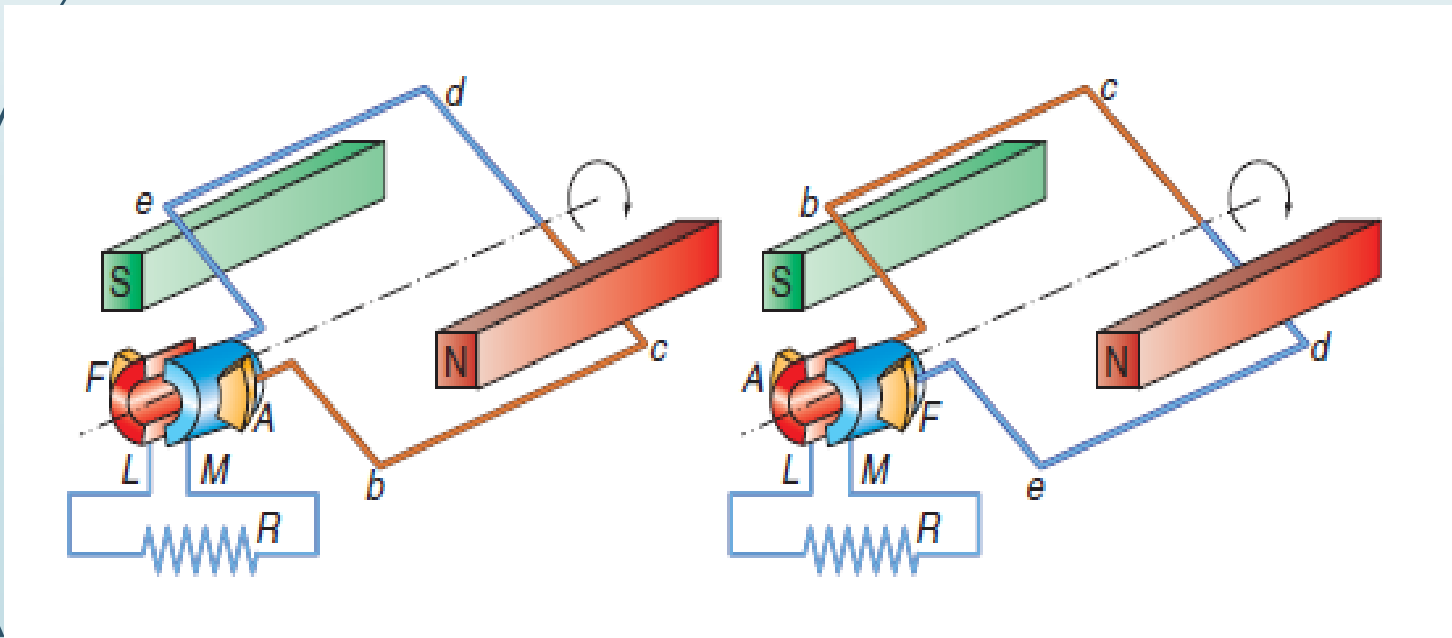


AL ESTAR CADA TERMINAL CONECTADO SIEMPRE CON EL MISMO ANILLO COLECTOR, DURANTE MEDIA VUELTA LA CORRIENTE CIRCULA EN UN SENTIDO, Y DURANTE LA OTRA MEDIA VUELTA EN SENTIDO CONTRARIO: **OBTENEMOS UNA CORRIENTE ALTERNA**

# GENERADORES DE CORRIENTE ELÉCTRICA

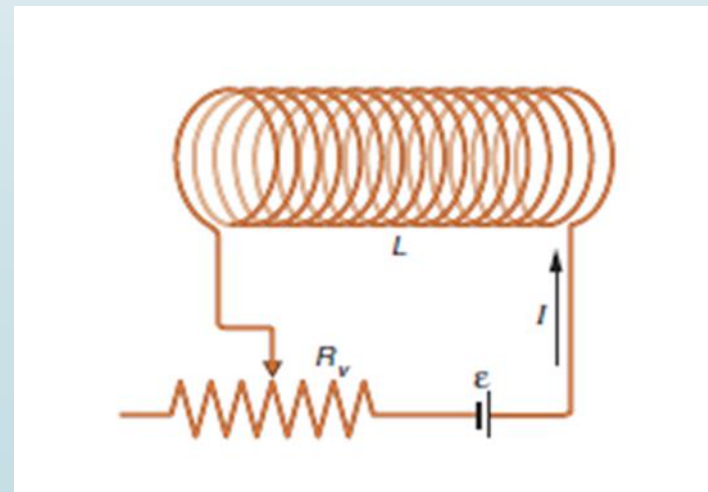
## ► 2. DINAMO

Con el mismo dispositivo anterior, conectamos los terminales a un colector formado por dos semianillos, de forma que los terminales están media vuelta en contacto con cada semianillo: **obtenemos una corriente continua** → la corriente siempre sale al exterior por el polo positivo y regresa por el negativo (circula siempre en el mismo sentido)




# AUTOINDUCCIÓN

- ▶ Hasta el momento: inductor e inducido eran dispositivos distintos
- ▶ FENÓMENO DE AUTOINDUCCIÓN: Cuando tenemos una bobina por la que circula una corriente variable, esta genera un campo magnético variable que produce una f.e.m. inducida → Como el circuito que induce es el mismo que el inducido, la f.e.m. se llama autoinducida
- ▶ Ahora es la propia espira la que se autoinduce una f.e.m.
- ▶ Para que exista f.e.m., necesitamos que la corriente sea variable, de forma que el campo magnético también varíe, y así exista corriente inducida. Esto se consigue:
  - ▶ Variando la resistencia
  - ▶ Generando corriente alterna



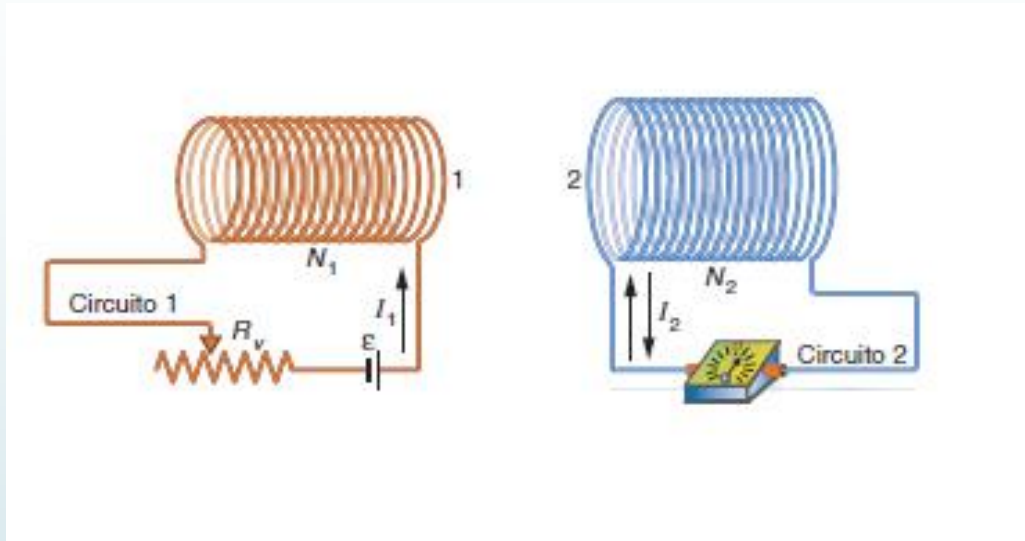
- Podemos calcular el flujo magnético en un solenoide, puesto que sabemos que su campo magnético  $B$  tiene un valor  $B = \mu \cdot N \cdot I / l$

- $L$  = coeficiente de autoinducción o inductancia (característico de cada circuito) . En el S.I. se mide en henrios (H)
- Si tenemos un circuito formado por una batería, un solenoide y un interruptor:
  - Al cerrar el circuito, la intensidad de corriente tarda un tiempo en alcanzar su valor estacionario  $I \rightarrow$  El flujo magnético a través de la bobina varía en ese tiempo de 0 hasta su valor máximo
  - Se induce una fuerza electromotriz (llamada fuerza contraelectromotriz) que se opone al aumento de la intensidad del circuito  $\rightarrow$  se dice que existe una contracorriente durante el inicio del paso de corriente por el circuito
  - De la misma forma, al abrir el circuito, la intensidad tarda un tiempo en anularse, ya que la fuerza contraelectromotriz se opone ahora a que la intensidad caiga hasta 0 de forma instantánea
- La autoinducción solo genera f.e.m. cuando varía la intensidad de la corriente. Su valor es proporcional al coeficiente de autoinducción o inductancia  $L$

- 
- ▶ EN TODOS LOS CIRCUITOS SE PRODUCE EL FENÓMENO DE LA AUTOINDUCCIÓN
  - ▶ Al abrir circuito, se corta el paso de la corriente, lo que hace que caiga el flujo magnético → se genera una f.e.m. autoinducida que se opone a esta disminución
  - ▶ La corriente autoinducida se llama corriente de apertura y circula en el sentido que circulaba la corriente antes de abrir el circuito
  - ▶ EN TODOS LOS CIRCUITOS SE PRODUCE EL FENÓMENO DE LA AUTOINDUCCIÓN
  - ▶ Al cerrar circuito, se pasa de un valor de intensidad de corriente 0 hasta el valor estacionario → se genera una f.e.m. autoinducida que se opone a este aumento
  - ▶ La corriente autoinducida se llama corriente de cierre y circula en sentido contrario al de la corriente principal del circuito
  - ▶ **PAG 245 N° 16,17,18 PAGG256 N°22,20,25,27,30**

# INDUCCIÓN MUTUA. TRANSFORMADORES

Todo circuito por el que circule una corriente variable induce una f.e.m. en otro circuito próximo a él. Este fenómeno se conoce como inducción mutua



- Si por el solenoide 1 circula una corriente  $I_1$ , produce un flujo de campo magnético a través del solenoide 2 proporcional a  $I_1$  ( $\Phi_2$ )
- $M_{1,2}$  es el coeficiente de inducción mutua que el circuito 1 produce en el circuito 2

►  $M_{2,1} = M_{1,2} =$  coeficiente de inducción mutua

► Se mide en henrios (H)

► Es una constante de construcción

► Su valor depende de:

► La distancia y orientación entre los solenoides

► Del material situado entre sus núcleos

► Del tamaño, la forma y el número de espiras de cada uno de los solenoides

**iiii M es independiente de la intensidad que circula por los solenoides !!!!**



## TRANSFORMADORES

- ▶ Núcleo cerrado de láminas de hierro dulce
- ▶ Las bobinas que forman los circuitos primario y secundario se enrollan a su alrededor
- ▶ Cada bobina tiene distinto número de espiras
- ▶ Como ambas están enrolladas sobre el mismo núcleo, el flujo a través de todas las espiras es igual, y la f.e.m. inducida en cada bobina proporcional a su número de espiras de cada uno de los solenoides

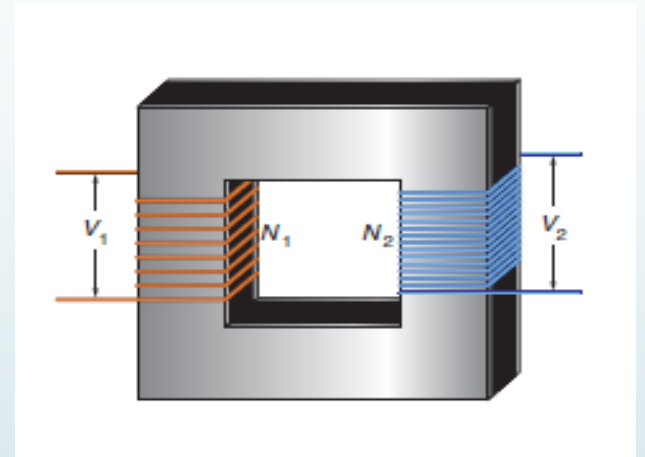
$$\varepsilon_1 = -N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}; \quad \varepsilon_2 = -N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



## ► TRANSFORMADORES

- Si  $R_{\text{bobinas}}$  despreciable  $\rightarrow$  f.e.m. =  $\Delta V$
- Un Transformador Modifica La Tensión De Una Corriente Variable Por Inducción Mútua Entre Las Bobinas Que Lo Conforman, De Manera Que El Voltaje En Cada Bobina Es Proporcional A Su Número De Espiras:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



- En un transformador ideal, la pérdida de energía es despreciable, de forma que la potencia que suministra el primario es igual a la que sale del secundario

## ► TRANSFORMADOR DE ALTA (Elevador)

► Se encarga de elevar la tensión de la corriente alterna producida en una central eléctrica:

- Se pasa de voltajes del orden de 10-20 kV a voltajes de 400 kV
- OBJETIVO: Reducir la intensidad que transporta la línea de alta tensión para minimizar pérdidas ( $P_{\text{disipada}} = I^2 \cdot R$ )
- Por tanto, en este caso  $N_2 > N_1$

## ► TRANSFORMADOR DE BAJA (Reductor)

► Reduce la tensión de la corriente eléctrica para su distribución a viviendas y empresas:

- Se reducen los voltajes de 400 kV que se utilizan en el transporte.
- Primero se pasa a una tensión media de unos 15 kV y, finalmente, a la tensión utilizada en las viviendas e industrias (220 y 380 V)
- Por tanto, en este caso  $N_2 < N_1$

# Síntesis electromagnética

## DIFERENCIAS ENTRE CAMPO ELÉCTRICO Y CAMPO MAGNÉTICO

- ▶ Campo eléctrico producido por cargas en reposo o en movimiento /campo magnético sólo se produce si las cargas están en movimiento
- ▶ Campo eléctrico actúa sobre cualquier carga /campo magnético actúa sólo sobre cargas en movimiento
- ▶ Campo eléctrico conservativo /campo magnético no conservativo
- ▶ Líneas de campo eléctrico son abiertas /líneas de campo magnético son cerradas
- ▶ Flujo de campo eléctrico a través de una superficie cerrada puede ser positivo, negativo o nulo/flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo
- ▶ Existen las cargas eléctricas aisladas/no existen los polos magnéticos aislados
- ▶ Campo eléctrico producido por una carga puntual es radial /campo magnético producido por una carga puntual es perpendicular a la dirección radial
- ▶ Una corriente eléctrica produce un campo magnético
- ▶ Un campo magnético variable produce una corriente eléctrica
- ▶ POR TANTO, LA ELECTRICIDAD Y EL MAGNETISMO SON MANIFESTACIONES DE UN MISMO FENÓMENO: EL ELECTROMAGNETISMO

# Síntesis electromagnética: Ec. De maxwell


- ▶ CONSIDERÓ LA EXISTENCIA DE UN CAMPO COMÚN: CAMPO ELECTROMAGNÉTICO
- ▶ SU TEORÍA SE BASA EN CUATRO ECUACIONES QUE CONOCEMOS COMO “ECUACIONES DE MAXWELL”
- ▶ PRIMERA ECUACIÓN DE MAXWELL → Una carga en reposo produce un campo eléctrico conservativo. Sus líneas de campo son abiertas (Teorema de Gauss)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

- ▶ SEGUNDA ECUACIÓN DE MAXWELL → Demuestra que las líneas de campo magnético son cerradas y que no existen monopolos magnéticos (teorema de Gauss para el campo magnético)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

TERCERA ECUACIÓN DE MAXWELL → Demuestra que todo campo eléctrico variable produce un campo magnético (extensión de la ley de Ampère)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \left( \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$


Término que recoge la evidencia experimental de la generación de campo magnético cuando varía el flujo de campo eléctrico

→ CUARTA ECUACIÓN DE MAXWELL → Muestra la relación entre el campo eléctrico y la variación temporal de flujo magnético  $\Phi_B$  (es la Ley de Faraday)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$