

Bloque I: Electricidad
Bloque II: Magnetismo
Bloque III: Ondas y Óptica
Tema 4. Magnetostática en el vacío

- 4.1. Fenómenos magnéticos. El campo magnético
- 4.2. Fuerza de Lorentz
- 4.3. Acción del campo magnético sobre una espira. Momento magnético
- 4.4. Fuentes de campo magnético: Ley de Biot-Savart
- 4.5. Flujo magnético
- 4.6. Ley de Ampère

Tema 5. Magnetostática en la materia

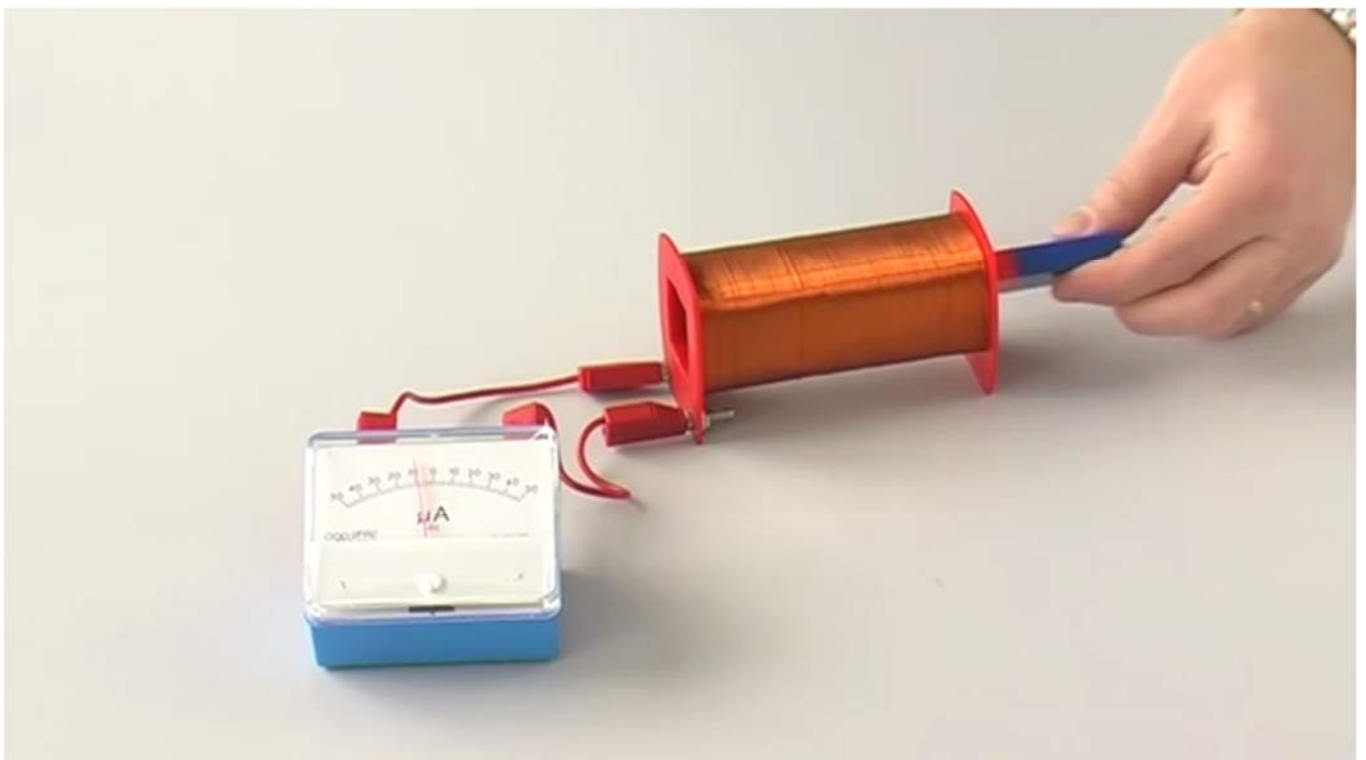
- 5.1. Imanación y susceptibilidad magnética
- 5.2. Teoría microscópica del magnetismo
- 5.3. Paramagnetismo, ferromagnetismo y diamagnetismo

Tema 6. Inducción electromagnética

- 6.1. Ley de Faraday-Lenz**
- 6.2. Corrientes de Foucault
- 6.3. Autoinducción e inducción mutua
- 6.4. Corriente de desplazamiento. Ecuaciones de Maxwell

PREGUNTA: ¿Cómo se produce la electricidad que llega a tu casa?

1



2

Introducción

~1830

Michael Faraday
Joseph Henry

Descubren simultáneamente que

Variación temporal del
flujo magnético que
atraviesa una espira

INDUCE

Corriente en la espira

Definición: Inducción magnética: Producción de corriente en una espira al variar en el tiempo el flujo magnético que la atraviesa.

A las **corrientes y las fem** correspondientes se les llama **inducidas**.

PENSAR: ¿De qué manera se puede cambiar el flujo que atraviesa una espira?

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Cocinas de inducción

Transformadores de corriente

GENERADORES

Necesario en centrales hidroeléctricas,
eólicas, térmicas, geotérmicas, nuclear,...

Pocas formas de generar electricidad sin
generadores: piezoelectricidad,
fotoelectricidad, termoelectricidad

3

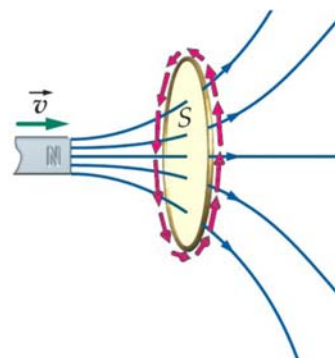
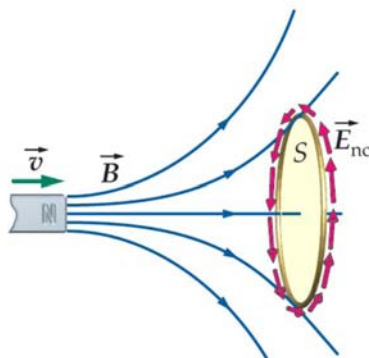
Ley de Faraday

Definición: Ley de Faraday: La variación del flujo magnético a través del área rodeada por un circuito **induce** una fem igual en módulo a dicha variación por unidad de tiempo.

$$|\varepsilon| = \left| \frac{d\phi}{dt} \right|$$

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

Por Ley de Lenz (veremos más adelante)



$$\oint_C \vec{E} d\vec{\ell} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{A}$$

Forma integral de la
Ley de Faraday

4

Ley de Lenz
Definición: Ley de Lenz:

La fem y la corriente inducidas poseen la dirección y el sentido que hace que **se opongan a la variación que las produce**.

Otra forma de verlo:

Cuando se produce una **variación del flujo** magnético que atraviesa una superficie, **aparece una corriente** inducida (por la Ley de Faraday)

La corriente inducida crea un campo magnético (que llamaremos campo magnético inducido).

Ese campo magnético inducido crea un flujo magnético (inducido) sobre la misma superficie

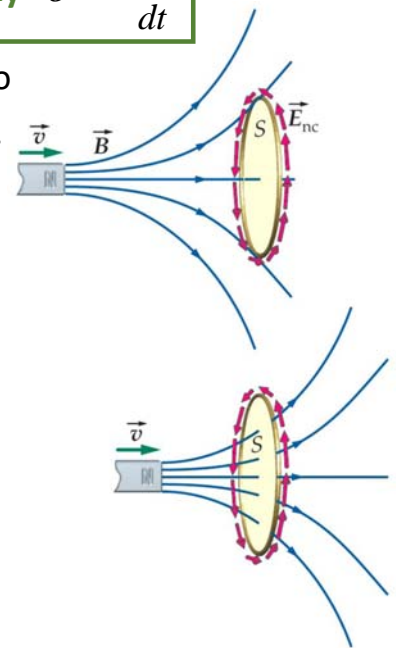
Ese nuevo flujo inducido **debe ser contrario** (por la ley de Lenz) a la **variación** de flujo inicial:

Si el flujo **inicial** estaba:

Entonces el flujo **inducido** es:

aumentando → **contrario** al inicial
disminuyendo → **en el mismo sentido** que el inicial

$$\text{Ley de Faraday } \varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$



5

EJEMPLO F-L 1: fem inducida por movimiento de imán y espira
Imán se acerca a la espira:

$$\text{Ley de Faraday } \varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

¿Está variando el flujo magnético sobre la espira? → **Sí**

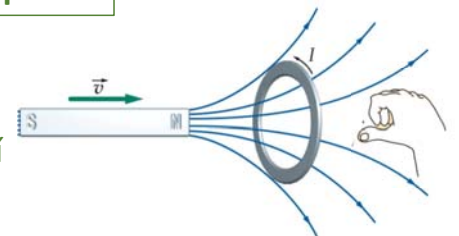
¿Aumenta o disminuye? → **Aumenta**

Entonces, ¿cómo será el flujo inducido, del mismo sentido o contrario? **Contrario**

Para que el flujo inducido sea así, ¿cómo tiene que ser el campo inducido? **Contrario al del imán**

¿Cómo tiene que ser la corriente inducida para crear ese campo inducido?

Vista desde la izquierda, iría en sentido antihorario, tal como muestra el dibujo.


Imán se acerca a la espira (otro razonamiento alternativo):


El campo magnético inducido se debe oponer al movimiento del imán

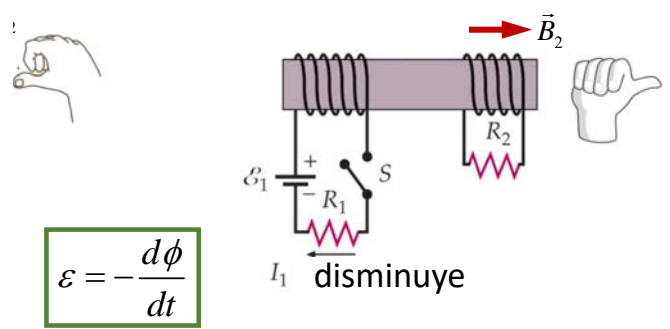
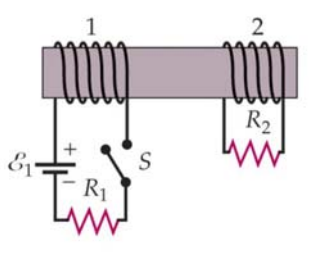
El momento magnético inducido en la espira debe tener polaridad opuesta al imán

Para producir ese momento magnético, la intensidad debe ir como en la figura

PENSAR: ¿Qué pasaría si no se cumpliera la ley de Lenz?

PENSAR: Razonar de forma similar lo que pasa al alejarse el imán de la espira

6

EJEMPLO F-L 2: fem inducida en un circuito por una corriente variable


$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

Se cierra el interruptor:

La corriente I_1 empieza a crecer → El campo B_1 empieza a crecer →
 → El flujo del campo B_1 sobre las espiras del circuito 2 empieza a crecer

Por la Ley de Faraday, va a aparecer una corriente inducida en el circuito 2.
 ¿Cuál será su sentido? Aplicamos Lenz:

- ¿Cómo será el flujo inducido, del mismo sentido o contrario? **Contrario, por Lenz**
- Para que el flujo inducido sea así, ¿cómo tiene que ser el campo inducido? **Contrario a B_1**
- ¿Cómo tiene que ser la corriente inducida para crear ese campo inducido?

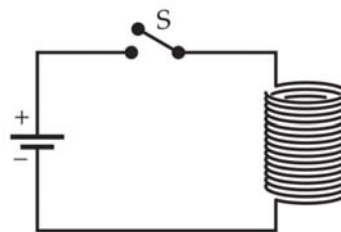
Vista desde la izquierda, iría en sentido antihorario, tal como muestra el dibujo (atención a cómo se enrolla el cable del circuito)

PREGUNTA: ¿Qué pasa al abrir el interruptor?

7

EJEMPLO F-L 3: fem autoinducida en un circuito con bobina

Experimento de Henry



$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

Se abre el interruptor:

La corriente I empieza a decrecer → El campo B empieza a decrecer →
 → El flujo del campo B sobre la bobina empieza a decrecer

Por la Ley de Faraday, va a aparecer una corriente inducida en la bobina.
 ¿Cuál será su sentido? Aplicamos Lenz:

- ¿Cómo será el flujo inducido, del mismo sentido o contrario? **Mismo, por Lenz**
- Para que el flujo inducido sea así, ¿cómo tiene que ser el campo inducido? **Mismo sentido que B**
- ¿Cómo tiene que ser la corriente inducida para crear ese campo inducido?

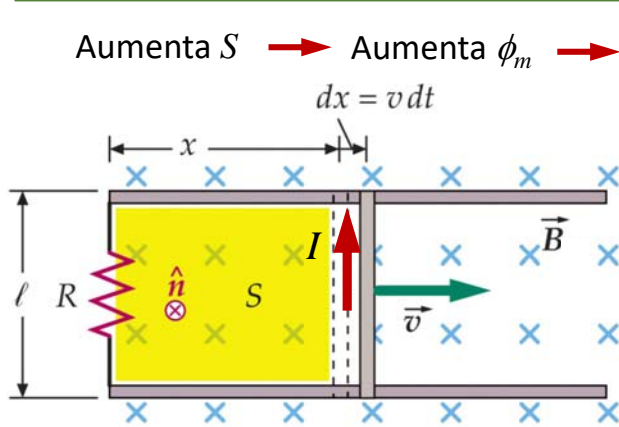
Tendrá el mismo sentido que la corriente inicial

Causa de descargas al desenchufar aparatos

Se cierra el interruptor:

Razonar: Causa de retardo en alcanzar intensidad máxima

8

EJEMPLO F-L 4: circuito de área variable


Aumenta $S \rightarrow$ Aumenta $\phi_m \rightarrow$ Por Faraday aparece una fem: $\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$

Para calcular la fem, calculamos el flujo:

$$\phi_m = \int_S \vec{B} d\vec{A} = BS = B\ell x$$

Calculamos la derivada del flujo:

$$\frac{d\phi_m}{dt} = \frac{d(B\ell x)}{dt} = B\ell \frac{dx}{dt} = B\ell v$$

Faraday $\rightarrow \boxed{\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -B\ell v}$

Esa fem va a crear una corriente. ¿Cuánto vale?

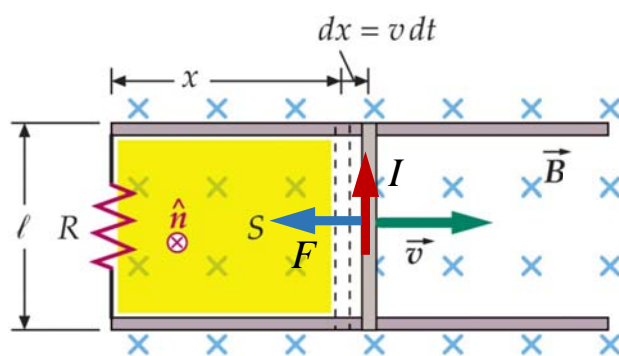
Ohm $\rightarrow \boxed{I = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B\ell v}{R}}$

¿Cuál será su sentido? Aplicamos Lenz:

Aumenta $\phi_m \rightarrow \phi_m$ inducido es contrario a $\phi_m \rightarrow B$ inducido es contrario a $B \rightarrow$
 \rightarrow Razonamos el sentido de I con la regla de la mano derecha:

La corriente inducida debe ser **antihoraria** (hacia arriba en la barra móvil)

9

EJEMPLO F-L 4: circuito de área variable

Además:

Al aparecer una corriente en un conductor que está dentro de un campo magnético

Fuerza magnética

$$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}$$

PENSAR: Si no supieras hacia dónde va la corriente ¿Sabrías en qué dirección va la fuerza?

Conductor hacia la derecha \rightarrow **Lenz** \rightarrow Fuerza magnética hacia la izquierda

Y sabiendo la dirección de la fuerza:

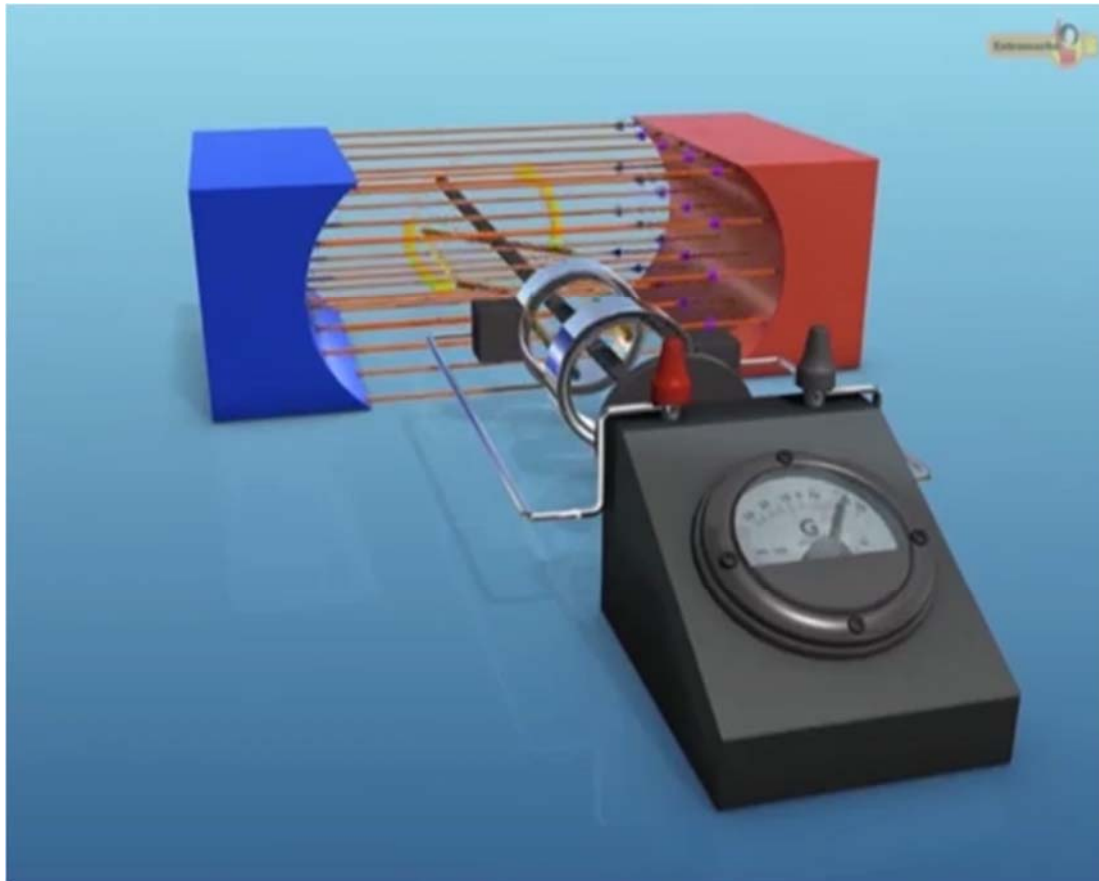
$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B} \rightarrow$ **Mano derecha** $\rightarrow I$ en conductor va hacia arriba

¿Y su módulo?

$$F = I\ell B = \frac{B\ell v}{R} \ell B = \frac{B^2 \ell^2 v}{R}$$

NOTAR: Fuerza magnética aumenta con la velocidad

Ejercicios: 1-6 relación. 3 y 4 de 2º parcial, de final 2018. 3 de 2º parcial 2018

EJEMPLO F-L 5: Generador


11

Bloque I: Electricidad
Bloque II: Magnetismo
Bloque III: Ondas y Óptica
Tema 4. Magnetostática en el vacío

- 4.1. Fenómenos magnéticos. El campo magnético
- 4.2. Fuerza de Lorentz
- 4.3. Acción del campo magnético sobre una espira. Momento magnético
- 4.4. Fuentes de campo magnético: Ley de Biot-Savart
- 4.5. Flujo magnético
- 4.6. Ley de Ampère

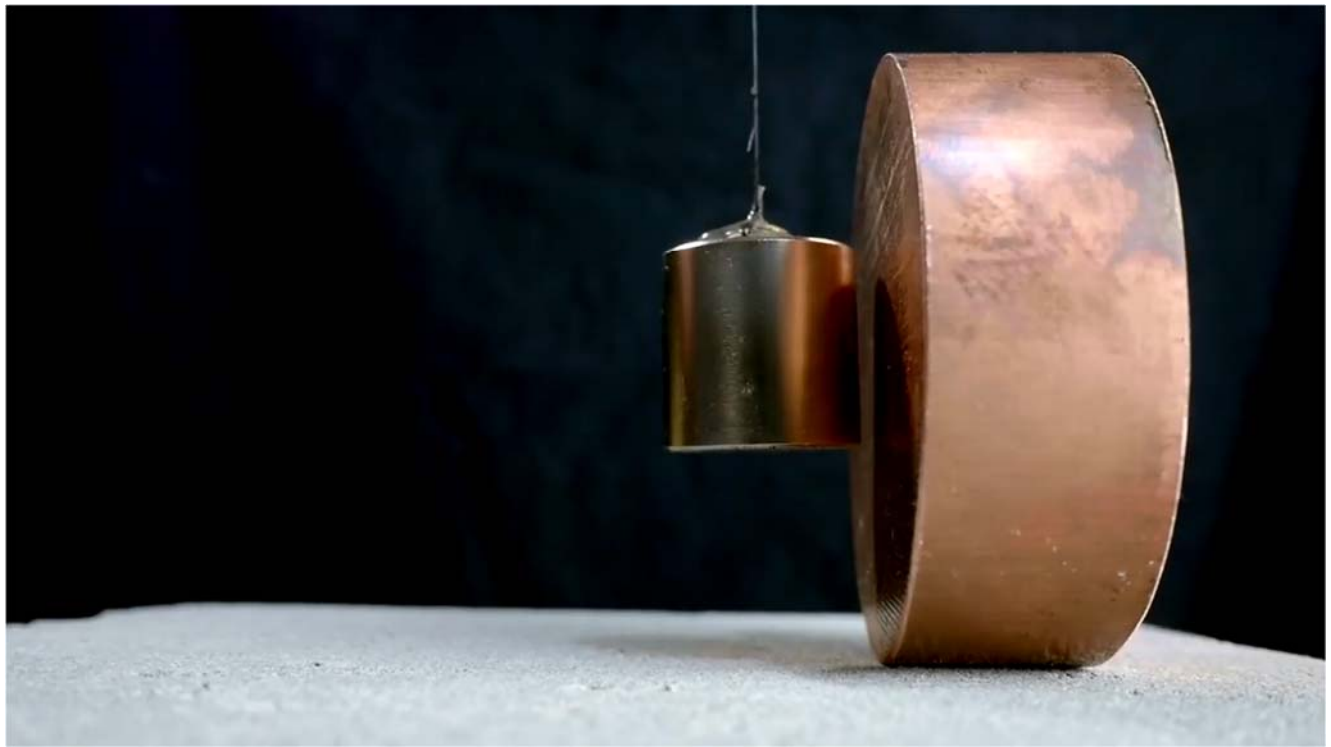
Tema 5. Magnetostática en la materia

- 5.1. Imanación y susceptibilidad magnética
- 5.2. Paramagnetismo, ferromagnetismo y diamagnetismo

Tema 6. Inducción electromagnética

- 6.1. Ley de Faraday-Lenz
- 6.2. Corrientes de Foucault**
- 6.3. Autoinducción e inducción mutua
- 6.4. Corriente de desplazamiento. Ecuaciones de Maxwell

12



PREGUNTA: ¿Qué hace que se pare el imán?

13

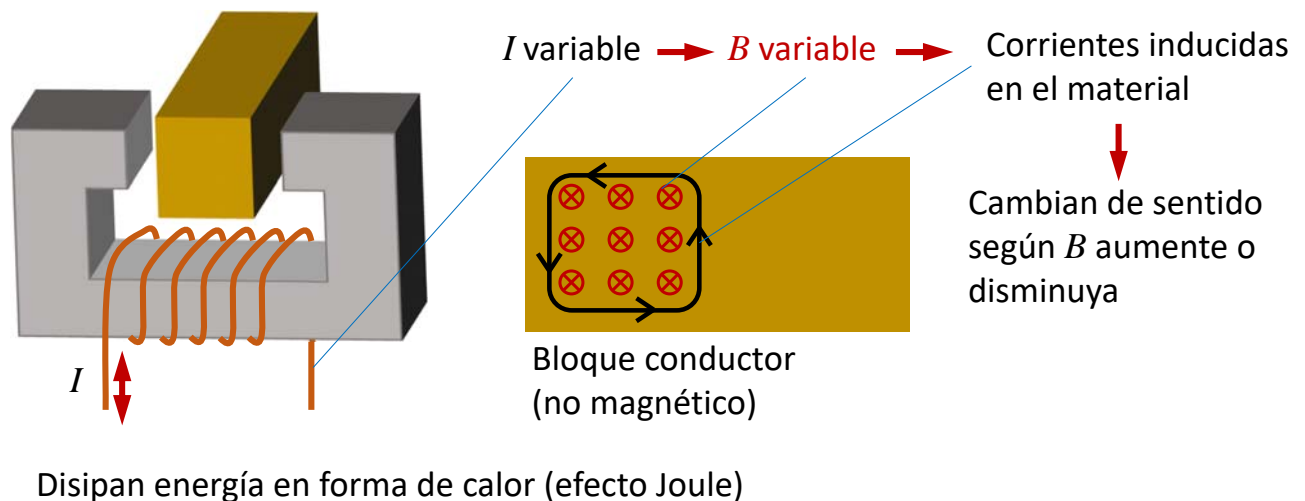
Corrientes de Foucault

Hasta ahora:

Corrientes en conductores 1D (de 1 dimensión): alambres, hilos, barras delgadas...

Definición: Corrientes de Foucault (turbillonarias o parásitas)(a.k.a. eddy currents):
Corrientes inducidas en bloques conductores extensos (2D o 3D) por variaciones del flujo de campos magnéticos.

EJEMPLO FOUCAULT 1: B variable



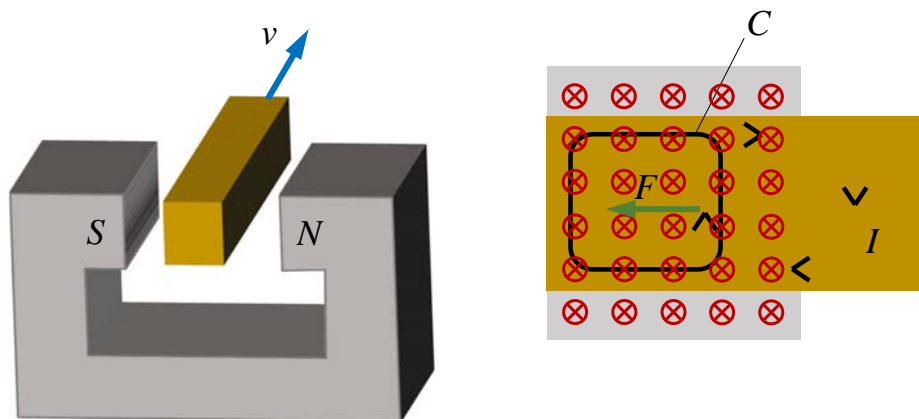
Fundamento físico de las cocinas de inducción

14



15

EJEMPLO FOUCAULT 2: Fuerza sobre conductor extenso al sacarlo de un campo B



Al sacar el conductor, el flujo a través del camino C disminuye

→ Aparece corriente inducida I

PENSAR: ¿Sentido?

Aparece fuerza $\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}$ contraria al desplazamiento

Para entender este fenómeno bien, hay que visualizar a los conductores macizos como hechos de múltiples espiras acopladas

PENSAR: ¿Qué condición debe cumplir un material para que aparezcan corrientes de Foucault? ¿Paramagnético, ferromagnético, diamagnético o conductor?

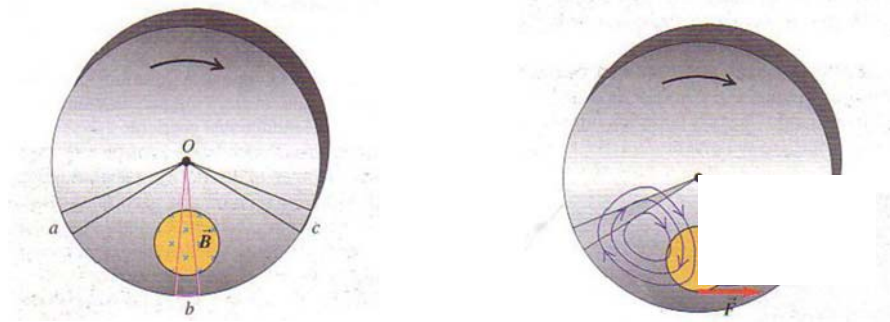
16



17



18

EJEMPLO FOUCAULT 3: Frenado de disco conductor rotatorio con campo B aplicado

¿Sentido de corrientes inducidas?

- Al girar, la sección Ob irá a la posición Oa , y pasará menos flujo magnético
- El campo magnético inducido debe ir en la misma dirección que el campo inicial, ya que el flujo está disminuyendo
- La corriente inducida I debe ser horaria en la zona ab

¿Sentido de fuerza magnética?

- En la zona de aplicación del campo inicial B , la corriente va hacia abajo
- Aplicando $\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}$, la fuerza va hacia la derecha (como debe de ser, ya que por Lenz debe ir en contra del movimiento)

PENSAR: Razonar de forma similar lo que sucede en la zona cb del disco

19

Aplicaciones de corrientes de Foucault

Amortiguación de oscilaciones no deseadas

Balanzas de precisión

Mesas antivibración

Frenos magnéticos

Trenes

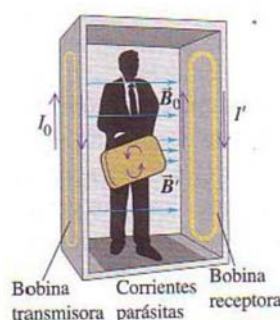
Sierras circulares

Detectores de metales

Aeropuertos

Supermercados

Portátiles



20

Aplicaciones de corrientes de Foucault

Identificación de metales

Monedas en máquinas expendedoras

Separación de residuos



21

Aplicaciones de corrientes de Foucault

Generación de calor

Cocinas de inducción

Forjas de inducción

En principio cualquier material conductor

En la práctica, mejor que concentren el campo magnético

Ferromagnéticos (además, usan histéresis – 10% del calor)



22

Evitar corrientes de Foucault

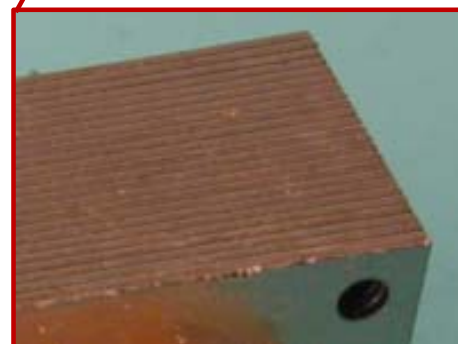
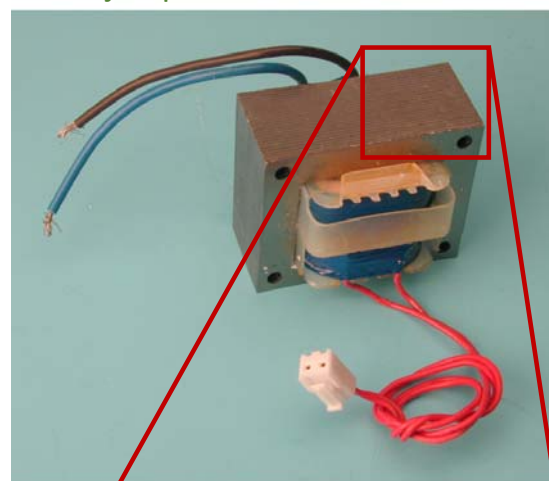
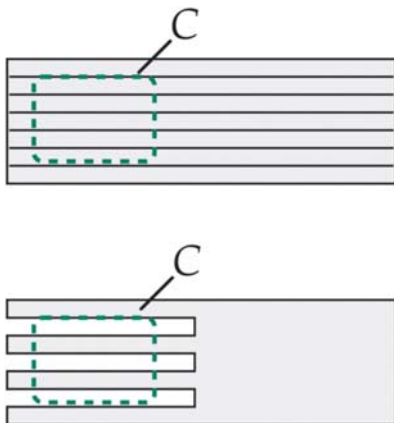


23

Evitar corrientes de Foucault

Cortar los caminos de las corrientes, laminando el material

Ejemplo: Transformadores



24

Bloque I: Electricidad
Bloque II: Magnetismo
Bloque III: Ondas y Óptica
Tema 4. Magnetostática en el vacío

- 4.1. Fenómenos magnéticos. El campo magnético
- 4.2. Fuerza de Lorentz
- 4.3. Acción del campo magnético sobre una espira. Momento magnético
- 4.4. Fuentes de campo magnético: Ley de Biot-Savart
- 4.5. Flujo magnético
- 4.6. Ley de Ampère

Tema 5. Magnetostática en la materia

- 5.1. Imanación y susceptibilidad magnética
- 5.2. Paramagnetismo, ferromagnetismo y diamagnetismo

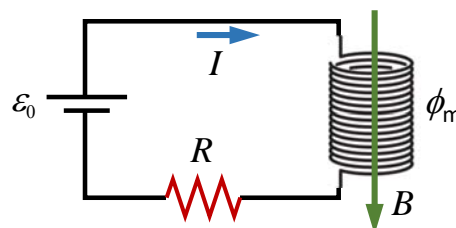
Tema 6. Inducción electromagnética

- 6.1. Ley de Faraday-Lenz
- 6.2. Corrientes de Foucault
- 6.3. Autoinducción e inducción mutua
- 6.4. Corriente de desplazamiento. Ecuaciones de Maxwell

Objetivo final: Relacionar **fem autoinducida** con **variación de corriente**

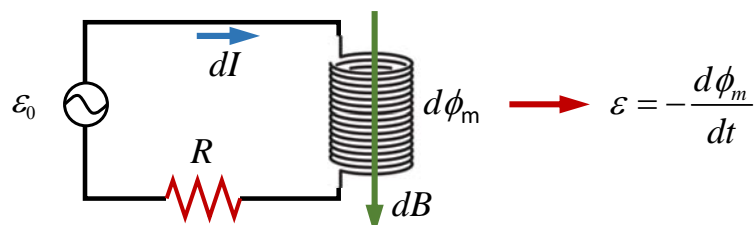
En circuito **estacionario**

Corriente (I) \longrightarrow Campo (B) \longrightarrow Flujo (ϕ_m)



En circuito con **corriente variable**

Variación de corriente (dI) \longrightarrow Variación de campo (dB) \longrightarrow Variación de flujo ($d\phi_m$) \longrightarrow fem autoinducida (ε)



Paso 1: Relación de la corriente I con el flujo ϕ_m

Sea cual sea el valor del campo B producido por una corriente I , siempre va a ser proporcional a esa corriente

$$\begin{cases} B \propto I \\ B = (\text{algo cte al variar } I) \cdot I \end{cases}$$

Por lo tanto (como el flujo es proporcional a B)

$$\begin{cases} \phi_m \propto I \\ \phi_m = (\text{otro algo cte al variar } I) \cdot I \end{cases}$$

Definición: Constante de autoinducción (L): Constante que relaciona la **corriente** que pasa por un circuito con el **flujo** del campo magnético que crea esa corriente.

$$L \equiv \frac{\phi_m}{I}$$

Unidades: Henrios (H) (Weber/Amperio)

L es difícil de calcular en general, pero **para un solenoide** podemos hacerlo:

Longitud = ℓ

Nº de espiras = N

Corriente = I

Área de una espira = A

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

Y el flujo será:

$$\phi_m = N \phi_{1 \text{ espira}} = N \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = N B A = \mu_0 \frac{N^2 I A}{\ell} = \mu_0 n^2 \ell I A$$

Con lo que la autoinducción valdrá:

$$L = \frac{\phi_m}{I} = \mu_0 n^2 \ell A$$

Ejercicios 8 y 9

¡La autoinducción depende solamente de factores geométricos!

FICHA 28-a,b

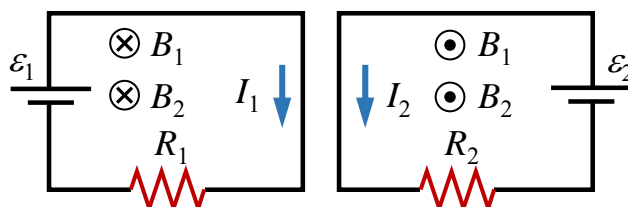
27

Paso 2: Relación de la variación de la corriente dI con fem de autoinducción (\mathcal{E})

Si varía la corriente, varía el flujo magnético autoinducido (hay $d\phi_m$)

Por lo tanto, por la Ley de Faraday: $\mathcal{E} = -\frac{d\phi_m}{dt}$ \rightarrow Aparece una fem autoinducida:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Inducción mutua


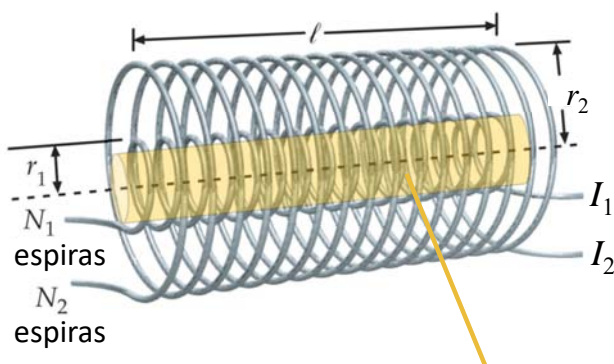
Circuito 1

Circuito 2

Si hay dos o más circuitos próximos, los campos magnéticos de unos van a causar un flujo magnético sobre los demás

Flujo en el circuito 2 causado por B_1 : $\phi_{m2,1} = M_{2,1} I_1$

Flujo en el circuito 1 causado por B_2 : $\phi_{m1,2} = M_{1,2} I_2$

EJEMPLO de Inducción mutua: Un solenoide dentro de otro

 Solenoide interior: N_1, r_1

 Solenoide exterior: N_2, r_2

 Calculamos primero $M_{2,1}$:

 Hacemos pasar I_1 por el solenoide 1, y calculamos $\phi_{m2,1}$

En el 2, producido por el 1

 La corriente I_1 crea un campo B_1 que es constante dentro del solenoide pequeño, y cero fuera:

$$\rightarrow B_1 = \mu_0 \frac{N_1}{\ell} I_1 = \mu_0 n_1 I_1$$

 Ese campo B_1 , al estar pasando también a través de las espiras del solenoide 2, crea flujo magnético en el solenoide 2:

$$\rightarrow \phi_{m2,1} = N_2 B_1 S_1 = (n_2 \ell) \mu_0 n_1 I_1 (\pi r_1^2)$$

Despejando:

$$M_{2,1} = \frac{\phi_{m2,1}}{I_1} = \mu_0 n_1 n_2 \ell \pi r_1^2$$

 ¿Y $M_{1,2}$? Hacemos pasar I_2 por el solenoide 2, y calculamos $\phi_{m1,2}$

$$B_2 = \mu_0 n_2 I_2 \rightarrow \phi_{m1,2} = N_1 B_2 S_1 = (n_1 \ell) \mu_0 n_2 I_2 (\pi r_1^2) \rightarrow M_{1,2} = \frac{\phi_{m1,2}}{I_2} = \mu_0 n_1 n_2 \ell \pi r_1^2$$

 Exactamente el mismo valor! En general: $M_{1,2} = M_{2,1} = M$

Ejercicio 10

FICHA 28-c,d

29

Bloque I: Electricidad
Bloque II: Magnetismo
Bloque III: Ondas y Óptica
Tema 4. Magnetostática en el vacío

- 4.1. Fenómenos magnéticos. El campo magnético
- 4.2. Fuerza de Lorentz
- 4.3. Acción del campo magnético sobre una espira. Momento magnético
- 4.4. Fuentes de campo magnético: Ley de Biot-Savart
- 4.5. Flujo magnético
- 4.6. Ley de Ampère

Tema 5. Magnetostática en la materia

- 5.1. Imanación y susceptibilidad magnética
- 5.2. Teoría microscópica del magnetismo
- 5.3. Paramagnetismo, ferromagnetismo y diamagnetismo

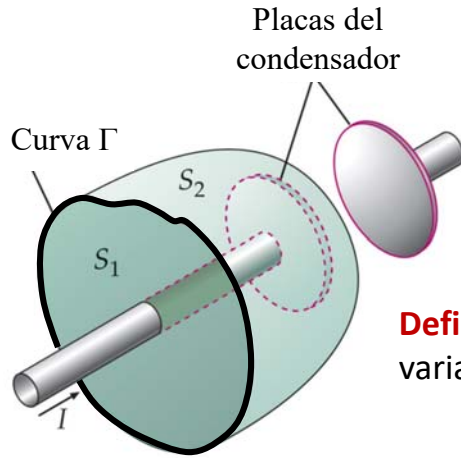
Tema 6. Inducción electromagnética

- 6.1. Ley de Faraday-Lenz
- 6.2. Corrientes de Foucault
- 6.3. Autoinducción e inducción mutua
- 6.4. Corriente de desplazamiento. Ecuaciones de Maxwell

Ley de Ampère para carga o descarga de un condensador

Hasta ahora, todas las corrientes que hemos visto son debidas al **movimiento de las cargas** en un conductor: son **corrientes de conducción**

PERO si sólo consideramos ese tipo de corrientes, la Ley de Ampère **no es válida** en algunos casos. Ejemplo: Carga o descarga de un condensador



$$\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 I_{\Gamma} \begin{cases} S_1 \longrightarrow I_{\Gamma} = I & \text{Bien definida} \\ S_2 \longrightarrow I_{\Gamma} = 0 & ??? \end{cases}$$

- No hay intercambio de carga entre las placas
- No hay corriente de conducción

Definición: Corriente de desplazamiento: Interpretamos la variación del flujo del campo eléctrico como una corriente.

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt} = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} d\vec{A}$$

Recordamos el Teorema de Gauss: $\phi_e = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \longrightarrow \epsilon_0 \phi_e \approx Q$

Movimiento de las cargas \longrightarrow

Corrientes de conducción

Variación del campo E \longrightarrow

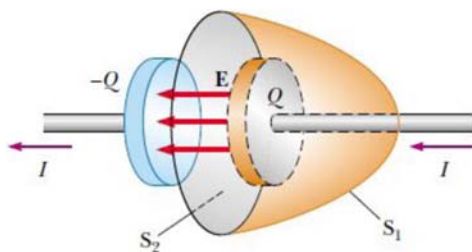
Corrientes de desplazamiento

31

Ley de Ampère-Maxwell

Maxwell añade el nuevo término de corriente de desplazamiento a la ecuación de Ampère, y así resuelve la aparente contradicción:

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 (I + I_d)_{\Gamma} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt}$$



$$S_1 \begin{cases} I_{S_1} = I \\ I_{d,S_1} = 0 \end{cases} \quad \text{Sólo corriente de conducción}$$

$$S_2 \begin{cases} I_{S_2} = 0 \\ I_{d,S_2} = \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt} = \epsilon_0 \frac{d}{dt} (EA) = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} A \right) = \\ = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left(\frac{Q/A}{\epsilon_0} A \right) = \frac{dQ}{dt} = I = I_{S_1} \end{cases} \quad \text{Sólo corriente de desplazamiento}$$

La corriente de desplazamiento que cruza la superficie S_2 es igual a la de conducción que cruza S_1

ATENCIÓN: Se introduce una **nueva fuente** del campo magnético:

Un **campo eléctrico variable** en el tiempo \longrightarrow

Genera \longrightarrow

Un **campo magnético**

32

Ecuaciones de Maxwell (en el vacío)

Reuniendo las leyes que hemos ido viendo en los temas anteriores, tendremos 4 leyes que son la base de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos:

Flujo de \vec{E}	$\oint_S \vec{E} d\vec{A} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$	<u>Teorema de Gauss</u> Cargas son fuentes de E
Flujo de \vec{B}	$\oint_S \vec{B} d\vec{A} = 0$	<u>Teorema de Gauss para B</u> No existen monopolos magnéticos
Circulación de \vec{E}	$\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_{S_{\Gamma}} \vec{B} d\vec{A}$	<u>Ley de Faraday</u> B variables son fuentes de E
Circulación de \vec{B}	$\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt}$	<u>Ley de Ampère-Maxwell</u> Corrientes son fuentes de B E variables son fuentes de B

Estas ecuaciones se completan con la expresión de la fuerza sobre una carga:

$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	<u>Fuerza de Lorentz</u> Fuerza de E y B sobre carga
---	---

E y B son dos caras de la misma moneda: **el campo electromagnético**